第 41 卷 第 14 期/2021 年 7 月/光学学报 研究论文

光学学报

# 夜光遥感卫星带外光谱响应校正研究

刘润山[1,2,3]，钟兴[3,4*]，马驰[3]，胡永红[5]，严林[5]，窦长勇[5]

[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；

[3]长光卫星技术有限公司，吉林 长春 130102；

[4]大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室，辽宁 大连 116024；

[5]中国科学院空天信息创新研究院数字地球重点实验室，北京 100094

**摘要** 通过建立“吉林一号”夜光遥感相机光谱响应模型，分析了出现带外光谱响应的原因，提出了夜光遥感卫星带外光谱响应校正的方法。根据遥感相机各谱段间光谱响应的关系，通过对不同光谱特性的标准光源进行计算得到带外响应校正系数，然后对夜光遥感图像目标光源的带外光谱响应进行校正，并通过在轨实验完成目标光源辐亮度反演。校正后的夜光遥感卫星辐亮度差异得到了明显的降低，平均辐亮度差异由 10.53%降低至 4.88%，且各谱段辐亮度差异均低于 7%。

**关键词** 遥感；带外光谱响应；夜光；辐亮度；校正

**中图分类号** TP722 **文献标志码** A **doi**：10.3788/AOS202141.1428002

# Correction of Out-Band Spectral Response of Night Light Remote Sensing Satellite

Liu Runshan[1,2,3], Zhong Xing[3,4*], Ma Chi[3], Hu Yonghong[5], Yan Lin[5], Dou Changyong[5]

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

[2] *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;

[3] *Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun, Jilin* 130102, *China*;

[4] *State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning* 116024, *China*;

[5] *Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100094, *China*

**Abstract** This paper built a spectral response model of the “Jilin-1” night light remote sensing camera to analyze the reasons of the out-band spectral response and proposed a method for the out-band spectral response correction of the night light remote sensing satellite. According to the relationship between the spectral response of the remote sensing camera in each band, the out-band response correction coefficient is obtained by calculating the standard light sources with different spectral characteristics. The out-band spectral response of the target light source in the night light remote sensing images is corrected, and the radiance of the target light source is inversed through on-orbit experiments. The corrected radiance difference of the night light remote sensing satellite is significantly reduced, with an average decreasing from 10.53% to 4.88%, and the radiance difference in each band is less than 7%.

**Key words** remote sensing; out-band spectral response; night light; radiance; correction

**OCIS codes** 280.4788; 280.4991; 120.5630; 350.5610

**收稿日期**：2020-12-02；**修回日期**：2021-01-19；**录用日期**：2021-02-07

**基金项目**：国家重点研发计划(2019YFE0127000)

**通信作者**：*ciomper@163.com



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 1 引 言

夜光遥感是在夜间天空无云时，利用遥感卫星获取城镇灯光、渔船灯光、火点等人造光源的影像。与日间遥感不同的是，夜光遥感能够更为直接地反映人类的社会活动，因此被广泛应用于社会经济领域的空间数据挖掘[1-3]。“吉林一号”视频卫星（以下简称“视频星”）夜光遥感影像是目前全球唯一公开的亚米级彩色夜光遥感数据源，被广泛地应用于社会经济参数估算、区域发展研究、重大事件评估、渔业监测等诸多研究领域。例如，2018 年浙江大学的 Zheng 等[4]以杭州为例，研究了选定区域的人工光亮度和土地利用之间的关系，成功地验证了视频星夜光遥感图像在监测城市空间格局和区分人造光源类型方面的有效性。以色列的 Guk 等[5]使用不同的传感器监测耶路撒冷地区不同种族、宗教群体的活动区域中的夜间亮度，通过分析其差异来测试多光谱成像价值，并以此验证视频星拍摄高分辨率夜光图像的能力。这些研究成果一方面说明利用彩色夜光遥感数据定量反演社会经济参数的可行性，另一方面也指出夜光遥感的应用效果更加依赖于拍摄场景辐射特征与相机输出信号之间关系模型的准确性，即夜光遥感的辐射精度是数据精细化、定量化应用的基础和前提。

视频星采用 Bayer 编码[6]探测器实现彩色拍摄。由于 Bayer 阵列滤光片生产工艺的限制，在保证滤光片带宽和透过率要求的前提下，Bayer 阵列滤光片各个通道不可避免地出现带外响应，造成了各个通道信号的混叠，导致夜光遥感图像数据精度降低。因此，研究如何对系统固有的带外响应进行校正，对提升数据定量化应用水平具有重要的意义。

本文通过实验室部件级测量方法得到夜光遥感相机的各谱段探测器的光谱响应度，同时结合地面光源场景的光谱特性求解得到带外响应的校正矩阵系数。在遥感图像数据的应用环节，代入校正矩阵系数对夜光遥感图像进行带外响应校正。最后利用地面目标光源对本文方法的有效性进行了在轨验证。

## 2 带外光谱响应校正方法

夜光遥感卫星的带外光谱响应校正包含两个步骤：夜光遥感相机带外视频光谱响应校正模型构建与带外光谱响应校正系数求解。前者是利用相机的辐射传输模型，构建相机每个像元在不同谱段的量化输出模型，并建立相机实际输出值与目标理论真值之间的校正矩阵，后者是根据光谱定标实验的光谱响应曲线以及不同地面光源场景的光谱特性，获取不同谱段范围内相机实际输出值与理论真值，完成带外响应校正矩阵系数求解，并利用校正矩阵对 Bayer 格式的夜光遥感图像进行带外光谱响应校正。

### 2.1 带外光谱响应校正模型

遥感相机各谱段的量化输出可由相机的光谱响应、有效光谱范围和积分时间决定[7]，表达式为

$$X_{\mathrm{DN}} \propto T_{\mathrm{int}} \times \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} R(\lambda) \times L(\lambda) \mathrm{d}\lambda, \tag{1}$$

其中 $X_{\mathrm{DN}}$ 为相机每个谱段的量化输出值，$T_{\mathrm{int}}$ 为积分时间，$L(\lambda)$ 为相机入瞳亮度，$R(\lambda)$ 为相机的光谱响应。

基于夜光成像的原理，夜光遥感相机入瞳处接收到的光束来源仅为光源发出的光线，因此可定义夜光成像的夜光遥感相机在 R、G、B 谱段的光谱响应模型为

$$\begin{cases} X_{\mathrm{DN,R}} = T_{\mathrm{int}} \times \int R_{\mathrm{R}} \times L_{\mathrm{R}}(\lambda) \mathrm{d}\lambda \\ X_{\mathrm{DN,G}} = T_{\mathrm{int}} \times \int R_{\mathrm{G}} \times L_{\mathrm{G}}(\lambda) \mathrm{d}\lambda \\ X_{\mathrm{DN,B}} = T_{\mathrm{int}} \times \int R_{\mathrm{B}} \times L_{\mathrm{B}}(\lambda) \mathrm{d}\lambda \end{cases}, \tag{2}$$

其中 $X_{\mathrm{DN,R}}$、$X_{\mathrm{DN,G}}$、$X_{\mathrm{DN,B}}$ 分别为夜光遥感相机采集目标 R、G、B 谱段在有效谱段范围内的量化输出值 $X_{\mathrm{DN}}$，$R_{\mathrm{R}}$、$R_{\mathrm{G}}$、$R_{\mathrm{B}}$ 分别为 R、G、B 谱段的归一化光谱响应，$L_{\mathrm{R}}(\lambda)$、$L_{\mathrm{G}}(\lambda)$、$L_{\mathrm{B}}(\lambda)$ 分别为 R、G、B 谱段在相机入瞳处的辐亮度。

滤光阵列探测到的更宽波长的光会导致相邻通道光谱混叠，即不同光谱间的带外响应。三种颜色相互混叠，导致夜光遥感相机采集到的目标不能正确显示其定量化的测量精度。根据(2)式，可定义实际单个像元在有效谱段的量化输出模型为

$$\begin{cases} X_{\mathrm{Cam,R}} = T_{\mathrm{int}} \times \left[ \int_{\lambda 3}^{\lambda 4} R_{\mathrm{R}} \times L_{\mathrm{R}}(\lambda) \mathrm{d}\lambda + \int_{\lambda 3}^{\lambda 4} R_{\mathrm{G}} \times L_{\mathrm{G}}(\lambda) \mathrm{d}\lambda + \int_{\lambda 3}^{\lambda 4} R_{\mathrm{B}} \times L_{\mathrm{B}}(\lambda) \mathrm{d}\lambda \right] \\ X_{\mathrm{Cam,G}} = T_{\mathrm{int}} \times \left[ \int_{\lambda 2}^{\lambda 3} R_{\mathrm{R}} \times L_{\mathrm{R}}(\lambda) \mathrm{d}\lambda + \int_{\lambda 2}^{\lambda 3} R_{\mathrm{G}} \times L_{\mathrm{G}}(\lambda) \mathrm{d}\lambda + \int_{\lambda 2}^{\lambda 3} R_{\mathrm{B}} \times L_{\mathrm{B}}(\lambda) \mathrm{d}\lambda \right] \\ X_{\mathrm{Cam,B}} = T_{\mathrm{int}} \times \left[ \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} R_{\mathrm{R}} \times L_{\mathrm{R}}(\lambda) \mathrm{d}\lambda + \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} R_{\mathrm{G}} \times L_{\mathrm{G}}(\lambda) \mathrm{d}\lambda + \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} R_{\mathrm{B}} \times L_{\mathrm{B}}(\lambda) \mathrm{d}\lambda \right] \end{cases}, \tag{3}$$



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

即

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{DN,out}}=\boldsymbol{M}_{\mathrm{cross}}\times\boldsymbol{P}, \tag{4}$$

其中 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{DN,out}}=[X_{\mathrm{Cam,R}},X_{\mathrm{Cam,G}},X_{\mathrm{Cam,B}}]^{\mathrm{T}}$ 为彩色相机采集目标在某谱段范围 R、G、B 单个像元的量化输出值 $X_{\mathrm{DN}}$，$\boldsymbol{M}_{\mathrm{cross}}$ 为 3×3 的图像传感器辐射传递矩阵，$\boldsymbol{P}=[X_{\mathrm{DN,R}},X_{\mathrm{DN,G}},X_{\mathrm{DN,B}}]^{\mathrm{T}}$ 为 R、G、B 光谱在某一谱段的量化输出值。

由图像传感器辐射传递逆矩阵 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{cross}}^{-1}$ 和(4)式，可得到遥感相机带外响应校正模型为

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{DN,real}}=\boldsymbol{M}_{\mathrm{cross}}^{-1}\times\boldsymbol{X}_{\mathrm{DN,out}}, \tag{5}$$

其中根据矩阵的逆运算，可知辐射传递逆矩阵 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{cross}}^{-1}$ 仍为一个 3×3 的矩阵，使用未知量 $k_1,k_2,\cdots,k_8,k_9$ 对校正矩阵进行元素填充可得

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{cross}}^{-1}=\begin{vmatrix} k_1 & k_2 & k_3 \\ k_4 & k_5 & k_6 \\ k_7 & k_8 & k_9 \end{vmatrix}。 \tag{6}$$

### 2.2 带外光谱响应校正系数求解

视频星的焦面包含 R、G、B 三个谱段，需要对每个谱段的光谱响应特性进行光谱定标实验[8]。利用已标定的单色仪调节不同波长的单色平行光，通过调节相机位置，使单色光斑打在相机各谱段的中心位置。以一定步进扫描采集各波长下的单色光斑图像，并将采集的原始图像数据减去暗背景信号以降低噪声的影响。通过对各波长下的图像进行高斯拟合求出夜光遥感相机的归一化相对光谱响应曲线，最终该相机的归一化相对光谱曲线如图 1 所示。

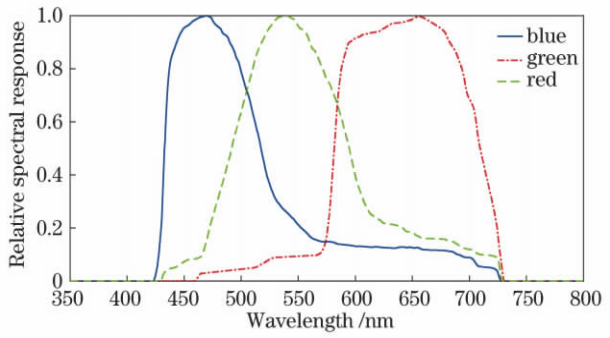


图 1 相对光谱响应曲线

Fig. 1 Relative spectral response

由“吉林一号”夜光遥感相机归一化相对光谱响应特性曲线可知，各谱段范围分别为 430～520 nm，490～580 nm，580～730 nm。但由于实际夜间地面光源复杂，无法准确地分析地面光源的光谱特性，因此校正系数应对不同光源具有较好的普适性。根据《城市夜景照明设计规范》公告，我国用于城市夜景照明的光源大致分为高压钠灯、发光二极管灯、荧光灯与卤素灯 4 种类型，故本研究选取这 4 种光源作为参照标准。图 2 为 4 种标准光源的光谱特性曲线。

可根据(3)式对具有不同光谱特性的标准光源以及传感器光谱响应函数计算得到不同谱段范围内的输出值，分别为 $[X_{\mathrm{DN,R}}\ \ X_{\mathrm{DN,G}}^{\mathrm{R}}\ \ X_{\mathrm{DN,B}}^{\mathrm{R}}]$、$[X_{\mathrm{DN,R}}^{\mathrm{G}}\ \ X_{\mathrm{DN,G}}\ \ X_{\mathrm{DN,B}}^{\mathrm{G}}]$、$[X_{\mathrm{DN,R}}^{\mathrm{B}}\ \ X_{\mathrm{DN,G}}^{\mathrm{B}}\ \ X_{\mathrm{DN,B}}]$，其中 $X_{\mathrm{DN,G}}^{\mathrm{R}}$、$X_{\mathrm{DN,B}}^{\mathrm{R}}$ 分别代表在红色有效谱段内 G，B 像元的带外响应，$X_{\mathrm{DN,R}}^{\mathrm{G}}$、$X_{\mathrm{DN,B}}^{\mathrm{G}}$ 分别代表在绿色有效

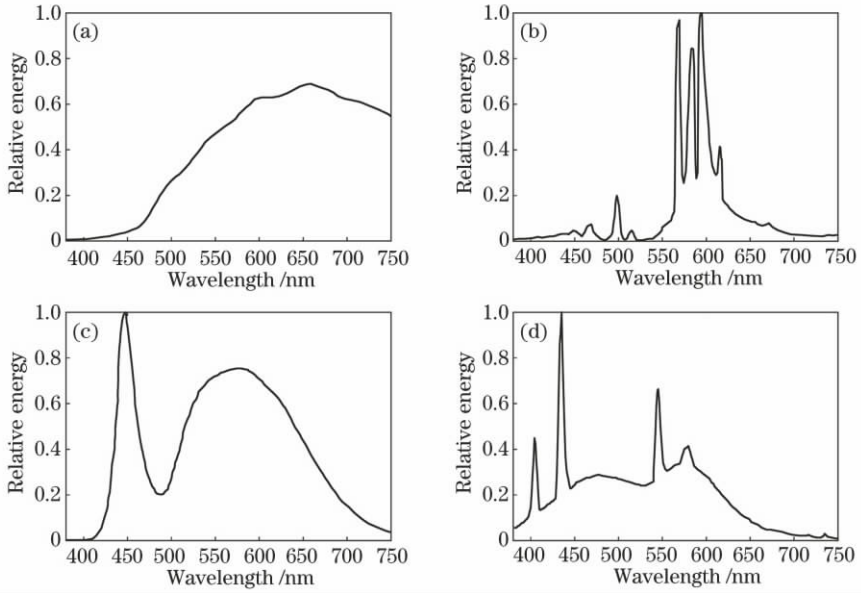


图 2 四种光源的光谱特性曲线。(a)卤素灯；(b)高压钠灯；(c)发光二极管灯；(d)荧光灯

Fig. 2 Spectral characteristic curves for four sources. (a) Halogen lamp; (b) high pressure sodium lamp; (c) light emitting diode; (d) fluorescent lamp



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

谱段内 R,B 像元上的带外响应,$X^{B}_{DN,R}$、$X^{B}_{DN,G}$ 分别代表在蓝色有效谱段内 R,G 像元的带外响应。

对于 R、G、B 谱段理想化的输出值为 $[X_{DN,R}\quad 0\quad 0]$,$[0\quad X_{DN,G}\quad 0]$,$[0\quad 0\quad X_{DN,B}]$,建立实际输出 DN 值与理想化输出 DN 值之间的映射模型,模型表达式为

$$\begin{vmatrix} X_{DN,R} & 0 & 0 \\ 0 & X_{DN,G} & 0 \\ 0 & 0 & X_{DN,B} \end{vmatrix} \Rightarrow \begin{vmatrix} X_{DN,R} & X^{R}_{DN,G} & X^{R}_{DN,B} \\ X^{G}_{DN,R} & X_{DN,G} & X^{G}_{DN,B} \\ X^{B}_{DN,R} & X^{B}_{DN,G} & X_{DN,B} \end{vmatrix}。\tag{7}$$

通过(4)式和(7)式可求解传感器辐射传递矩阵。重复上述步骤对 4 种标准光源进行传感器辐射传递矩阵求解,得到辐射传递矩阵 $\boldsymbol{M}_{cross_1}$,$\boldsymbol{M}_{cross_2}$,$\boldsymbol{M}_{cross_3}$,$\boldsymbol{M}_{cross_4}$,然后求其均值,生成最终的传感器辐射传递矩阵,即

$$\bar{\boldsymbol{M}}_{cross}=\begin{vmatrix} 0.9974 & 0.0270 & 0.0124 \\ 0.0861 & 0.9881 & 0.0955 \\ 0.0412 & 0.0559 & 0.9968 \end{vmatrix}。\tag{8}$$

对传感器辐射传递矩阵(8)式进行求逆计算,即可得到最终的光谱带外响应校正矩阵为

$$\bar{\boldsymbol{M}}^{-1}_{cross}=\begin{vmatrix} 1.0053 & -0.0269 & -0.0100 \\ -0.0841 & 1.0198 & -0.0967 \\ -0.0369 & -0.0561 & 1.0090 \end{vmatrix}。\tag{9}$$

如图 3 所示为 Bayer 彩色滤光阵列,由于在每个传感器像元上仅对一种颜色分量进行了采样,因此为了生成彩色图像,需要从采样的颜色中恢复缺失的颜色,这通常可通过数字图像处理部分中的颜色插值处理来实现。在图像颜色插值预处理之前进行带外响应校正,可以降低插值过程中引入的颜色估算误差。

根据 Bayer 图像的颜色分布并考虑图像邻域的颜色相关性,以待校正像元为中心选取其邻域 3×3 像元,通过代入校正矩阵 $\bar{\boldsymbol{M}}^{-1}_{cross}$ 内的各谱段校正系数

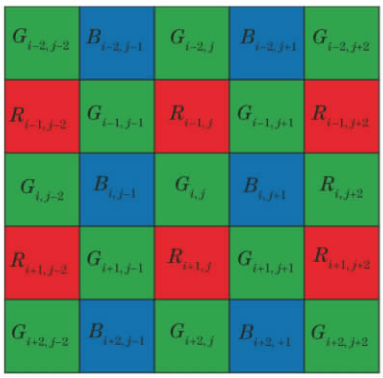


图 3 Bayer 彩色滤光阵列

Fig. 3 Bayer color filter array

并利用邻域相同颜色分量值实现了带外响应校正。以 Bayer 图像上$(i,j)$和$(i+1,j+1)$位置处的 G 像元为例,利用其邻域范围内的两个 R 像元和两个B 像元的平均值和校正系数 $k_4$,$k_5$,$k_6$ 来对 G 像元进行带外响应校正计算,即

$$\begin{cases} G_{i,j}=k_4\times\dfrac{R_{i-1,j}+R_{i+1,j}}{2}+ \\ \qquad k_5\times G_{i,j}+k_6\times\dfrac{B_{i,j-1}+B_{i,j+1}}{2} \\ G_{i+1,j+1}=k_4\times\dfrac{R_{i+1,j}+R_{i+1,j+2}}{2}+ \\ \qquad k_5\times G_{i+1,j+1}+k_6\times\dfrac{B_{i,j+1}+B_{i+2,j+1}}{2} \end{cases}。\tag{10}$$

以$(i-1,j)$位置处的 R 像元为例,通过邻域范围内的 4 个 G 像元和 4 个 B 像元的平均值和校正系数 $k_1$,$k_2$,$k_3$ 来对 R 像元进行带外响应校正计算,即

$$R_{i-1,j}=k_1\times R_{i-1,j}+k_2\times \frac{G_{i-2,j}+G_{i,j}+G_{i-1,j-1}+G_{i-1,j+1}}{4}+ k_3\times\frac{B_{i-2,j-1}+B_{i-2,j+1}+B_{i,j-1}+B_{i,j+1}}{4}。\tag{11}$$

同理$(i,j+1)$位置处的 B 像元带外响应校正公式为

$$B_{i,j+1}=k_9\times B_{i,j+1}+k_8\times \frac{G_{i-1,j+1}+G_{i,j}+G_{i,j+2}+G_{i+1,j+1}}{4}+ k_7\times\frac{R_{i-1,j}+R_{i-1,j+2}+R_{i+1,j}+R_{i+1,j+2}}{4}。\tag{12}$$

将带外响应校正矩阵各元素代入 Bayer 彩色滤光阵列校正公式[(10)~(12)式]内,即可得到最终的经过带外响应校正后的 Bayer 格式图像。

## 3 在轨验证实验及数据处理

### 3.1 在轨实验

2020 年 7 月 12 日在吉林省长春市庙香山开展了在轨验证实验,采用金属卤化物灯作为目标光源,利用视频星获取目标光源图像,在实验室对光源的辐亮度进行同步测量。将卫星获取的图像数据按照本文提出的方法进行带外响应校正,最后与地面测试数据进行对比分析,并评估带外响应校正前后的辐亮度差异大小。

视频星夜光成像是通过姿态机动实现目标场景



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的凝视成像，进而通过延长曝光时间来提高成像灵敏度，具备对城市灯光等场景进行遥感成像的能力。因此，卫星成像过程中对目标光源的拍摄角度是时刻变化的，需要对目标光源的朗伯特性进行测试，以评估光源辐亮度角度方向差异性带来的影响。此外视频星的对地分辨率为 0.92 m，一般情况下大于人造光源的几何尺寸，为了更接近真实情况，本实验选取的目标光源几何尺寸应小于卫星的分辨率。

本次实验一共采用了 5 组目标光源，如图 4(a)所示，每一组光源包括金属卤化物灯和黑色灯箱两部分。金属卤化物灯性能稳定，且实验室长时间测量该光源时其电稳定性的相对标准偏差优于0.5%，满足外场长时开机工作的需求。黑色金属灯箱将光源四周进行包裹，上表面设置圆形通光光阑，用于避免地表对光源散射造成误差。此外，考虑到相机探测器输出信号和输入能量间具有一定的非线性关系，可设置不同大小的光阑孔径来对光源辐射通量进行调节，以实现不同亮度光源的模拟。其中光阑孔径 $\varphi$ 分别为 0.08，0.15，0.20，0.25，0.30 m，并对其进行标号分别为 1 号光源、2 号光源、3 号光源、4 号光源、5 号光源。在实验室利用便携式地物光谱仪(ASD)测量了光源的光谱辐亮度曲线，图 4(b)为测试现场，图 4(c)为 3 号光源的测试结果。

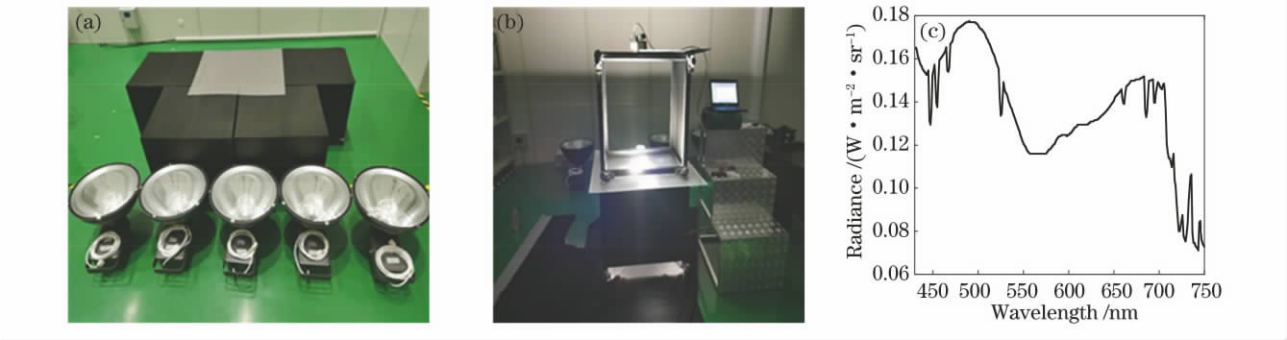


图 4 地面实验。(a)金属卤化物灯；(b)光源辐亮度测试现场；(c)光源辐亮度曲线

Fig. 4 Ground experiment. (a) Metal halide lamp; (b) light source radiance measurement site; (c) radiance curve

外场实验场地为吉林省长春市庙香山(位于 125°52′56.77″E，43°57′27.93″N)，图 5(a)为庙香山白天卫星图像，可见该场地人烟稀少，地势空旷，没有城市光源的干扰，可作为良好的夜间外场实验场地。实验夜间月相为下弦月，在该月相条件下月球的平均光照度为 0.02 lx[9]，且远低于目标光源的光照度，因此月球对本次实验的影响可以忽略不计。为保证光源信号不饱和且具有较高的信噪比，根据相机辐射响应特性，将相机曝光时间设置为 50 ms。卫星过顶拍摄时刻为 20:36，卫星光轴指向角度变化为 0.041°。根据实验室测试结果，在水平与垂直方向±20°范围内光源辐亮度变化低于 1.08%，由此证明该光源具有较好的朗伯性，卫星姿态变化对实验结果没有影响。最终通过视频星获取的图像如图 5(b)所示，其中 1～5 号光源均未达到饱和状态。

在卫星过顶前 30 min 时，利用全自动太阳/天空/月亮光度计 CE318-TS9[10]对实验区域的气溶胶光学厚度(AOD)进行测量，CE318-TS9 实物如图 6 所示。在轨实验时间满足 CE318-TS9 夜晚观测为上弦月至下弦月的使用时段，仪器在自动模式下可

图 5 庙香山卫星图像及其目标光源图像。(a)庙香山卫星图像；(b)目标光源图像

Fig. 5 Satellite image of Miaoxiangshan and target light source image. (a) Satellite image of Miaoxiangshan; (b) target light source image



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对月同步跟踪，直接测量在 9 个波段处的月光从而得到观测数据，并通过数据处理软件获取气溶胶的光学厚度。

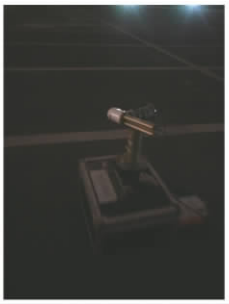

图 6 光度计 CE318-TS9

Fig. 6 CE318-TS9

结合地面气象站获取的大气参数以及气溶胶光学厚度参数，利用 MODTRAN 软件[11]仿真得到大气透过率。MODTRAN 仿真的基本输入参数如表 1 所示，大气透过率曲线的仿真结果如图 7 所示。

表 1 MODTRAN 仿真基本输入参数

Table 1 Basic input parameters

| Parameter | Item |
|---|---|
| Model atmosphere | Mid-Latitude Summer |
| AOD (550 nm) | 0.13 |
| Satellite zenith /(°) | 18.30 |
| Satellite azimuth /(°) | 3.52° |
| Aerosol model used | Rueal (visibility: 23 km) |

### 3.2 实验数据分析

经 ASD 测得目标光源中心方向的积分辐亮度值为 $L^{\mathrm{tar}}$，仿真得到的大气透过率为 $\tau_{\mathrm{atm}}$，则大气上界积分辐亮度值 $L^{\mathrm{toa}}$ 为

$$L^{\mathrm{toa}}=L^{\mathrm{tar}}\times\tau_{\mathrm{atm}}。\tag{13}$$

视频星相机入瞳处的辐亮度与大气上界辐亮度相同，则地面目标光源在视频星相机入瞳处的等效光谱辐亮度 $L^{\mathrm{ref}}$ 为

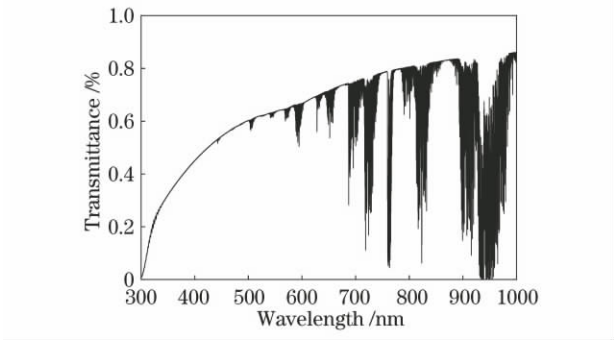


图 7 大气透过率曲线

Fig. 7 Atmospheric transmittance

$$L^{\mathrm{ref}}=\frac{\int L^{\mathrm{toa}}(\lambda)R(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int R(\lambda)\mathrm{d}\lambda}。\tag{14}$$

通过视频星获取的图像为 Bayer 编码格式，首先采用自适应残差插值(ARI)算法[12]填补图像中的空缺像素值，并分别得到 R、G、B 三个谱段的图像。在此基础上，采用最大类间方差(OTSU)法[13]分别提取三个谱段的目标光源有效像素。视频星相机在地面辐射定标实验过程中测量了相机输入信号与输出灰度值的关系，该关系式[14]可以表示为

$$L_x=X_{\mathrm{DN},x}\times a_x+b_x,\tag{15}$$

其中：$L_x$ 为对应谱段的辐亮度值，辐亮度单位为 $\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot sr^{-1}\cdot \mu m^{-1}}$；$X_{\mathrm{DN}}$ 为夜光遥感图像中光源有效区域的灰度值；$x$ 表示为 R、G、B 三个不同的谱段；$a$ 和 $b$ 分别为实验室测得的辐射定标增益系数与偏置。将图像目标光源有效像素值 $X_{\mathrm{DN}}$ 代入(15)式，即可得到由图像反演的带外响应校正前后目标光源在相机入瞳处的辐亮度值 $L^{\mathrm{ori}}$ 和 $L^{\mathrm{cor}}$。

$L^{\mathrm{ref}}$ 代表了光源经过大气辐射传输后在相机入瞳处的辐亮度参考值，$L^{\mathrm{ori}}$ 和 $L^{\mathrm{cor}}$ 分别表示由图像反演得到的带外响应校正前、后的光源辐亮度，并将二者与参考值进行对比，即可定量评估本文方法的误差，对比结果如图 8 所示。

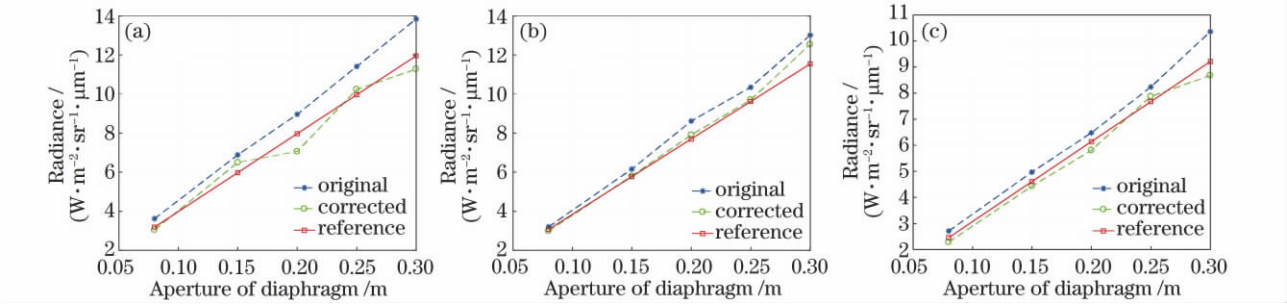


图 8 辐亮度反演结果。(a)谱段 R；(b)谱段 G；(c)谱段 B

Fig. 8 Radiance inversion results. (a) Red; (b) green; (c) blue



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图像反演结果与实际测量结果的差异大小可以用相对辐亮度差异来表述，即

$$\delta_{\mathrm{ori}}=\left|\frac{L^{\mathrm{ref}}-L^{\mathrm{ori}}}{L^{\mathrm{ref}}}\right|,\delta_{\mathrm{cor}}=\left|\frac{L^{\mathrm{ref}}-L^{\mathrm{cor}}}{L^{\mathrm{ref}}}\right|,\quad(16)$$

分别代入图像数据带外响应校正前、后的辐亮度 $L^{\mathrm{ori}}$、$L^{\mathrm{cor}}$ 并计算相对辐亮度差异，计算结果如表 2 所示。

表 2 带外响应校正前后辐亮度差异对比结果

Table 2 Comparison of radiance difference before and after out-band response correction unit：%

| Band | Original | Corrected |
|---|---|---|
| Red | 14.28 | 6.60 |
| Green | 8.61 | 3.15 |
| Blue | 8.71 | 4.89 |
| Average | 10.53 | 4.88 |

由表 2 可知：根据实验结果可以看出，经过带外响应校正之后，相对辐亮度差异明显降低，校正前后三个谱段的辐亮度平均差异由 10.53% 降低至 4.88%，这说明本文提出的方法可以在一定程度上校正夜光数据光谱的带外响应。但是校正后的辐亮度与实测值仍存在差异，这是由实验的诸多环节影响所决定的，包括目标光源辐亮度测量误差、大气透过率仿真误差、相机辐射定标误差、标准光源光谱辐射差异以及图像噪声影响等。

## 4 结 论

根据 Bayer 彩色滤波阵列遥感图像的像元分布以及夜光遥感相机成像系统的光谱响应特性，针对成像系统固有的带外光谱响应，提出了一种夜光遥感卫星带外响应校正的方法。对不同光谱特性的标准光源进行计算得到带外响应校正矩阵，并对“吉林一号”视频星夜光遥感图像完成带外响应校正。实验结果表明，该带外响应校正方法能够有效地提高相机的辐射测量精度，校正前后的辐亮度与参考值的辐亮度相对差异得到了明显的改善，初步验证了该带外响应校正模型在“吉林一号”夜光遥感相机成像系统精度验证方面应用的可行性，同时为夜光遥感图像在定量遥感上的应用提供了更为精准的数据参考。

## 参 考 文 献


[1] Levin N, Kyba C C M, Zhang Q L, et al. Remote sensing of night lights: a review and an outlook for the future [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 237: 111443.

[2] Li C, Zhu H L, Ye X Y, et al. Study on average housing prices in the inland capital cities of China by night-time light remote sensing and official statistics data[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 7732.

[3] Zhao N Z, Cao G F, Zhang W, et al. Remote sensing and social sensing for socioeconomic systems: a comparison study between nighttime lights and location-based social media at the 500 m spatial resolution[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2020, 87: 102058.

[4] Zheng Q M, Weng Q H, Huang L Y, et al. A new source of multi-spectral high spatial resolution night-time light imagery: JL1-3B[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 215: 300-312.

[5] Guk E, Levin N. Analyzing spatial variability in night-time lights using a high spatial resolution color Jilin-1 image: jerusalem as a case study[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 163: 121-136.

[6] Bayer B E. Color imaging array: US3971065 [P]. 1976-07-20.

[7] Cota S A. PICASSO: an end-to-end image simulation tool for space and airborne imaging systems [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2010, 4(1): 043535.

[8] Jin H, Jiang H L, Zheng Y Q, et al. Spectral calibration of the hyperspectral optical remote sensor [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2013, 34(2): 235-239.
金辉，姜会林，郑玉权，等. 高光谱遥感器的光谱定标[J]. 发光学报，2013，34(2)：235-239.

[9] Hänel A, Posch T, Ribas S J, et al. Measuring night sky brightness: methods and challenges[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 205: 278-290.

[10] Barreto Á, Cuevas E, Granados-Muñoz M J, et al. The new sun-sky-lunar cimel CE318-T multiband photometer: a comprehensive performance evaluation [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2016, 9(2): 631-654.

[11] Tao D X, Zhao H J, Jia G R. A MODTRAN-based double-lookup-tables retrieval algorithm for water vapor amount of hyperspectral data[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1001001.
陶东兴，赵慧洁，贾国瑞. 基于 MODTRAN 的双查找表法反演高光谱数据的水汽含量[J]. 光学学报，2012，32(10)：1001001.

[12] Monno Y, Kiku D, Tanaka M, et al. Adaptive residual interpolation for color and multispectral image demosaicking [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2017, 17(12): E2787.

[13] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.

[14] Schowengerdt R A. Remote sensing, models and methods for image processing [M]. 3rd ed. Burlington: Academic Press, 2007: 515.




(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net