

文章编号 1004-924X(2007)08-1186-05

# 空间光学遥感器的辐射传递特性与校正方法

任建伟<sup>1</sup>, 万志<sup>1,2</sup>, 李宪圣<sup>1</sup>, 任建岳<sup>1</sup>

(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 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 由于受大气背景辐射和自身光电响应特性的影响, 对地观测的空间光学遥感器所获取的原始数字图像与景物真实的辐射亮度图像相差甚远<sup>[1]</sup>, 为此, 通过对光学传感器辐射定标, 建立了入射辐射亮度与输出图像灰度间的辐射响应函数, 来实现辐射亮度图像的反演和辐射校正。根据光学遥感器辐射传递转换过程, 采用泰勒级数和矩阵函数模型描述了“辐射响应函数”的物理概念, 并提出了多次回归分析求解矩阵方程获得辐射校正系数的方法。在进一步的实验中, 结合积分球扩展辐射源对某型号民用相机进行实验室辐射定标, 获得了该相机的辐射响应函数。实验结果表明, 该方法可行且实用。最后, 对实验获得“辐射响应函数”的物理意义以及辐射定标精度等问题进行了讨论。

**关键词:** 光学遥感器; 空间相机; 辐射定标; 辐射亮度反演

**中图分类号:** TP73 **文献标识码:** A

## Radiation transfer characteristic and calibrating method for space optical remote sensor

REN Jian-wei<sup>1</sup>, WAN Zhi<sup>1,2</sup>, LI Xian-sheng<sup>1</sup>, REN Jian-yue<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** Being influenced by background radiation and opto-electrical response characteristics, the original digital image acquired by space optical remote sensor is very different from radiance image of real target. Therefore, the response function between input radiance and image grey level is established by calibrating the optical remote sensor to perform radiance image retrieval and radiation calibration. According to radiation transfer and conversion process of remote sensing signal, the physical concept of radiation response function is described using the model of Taylor progression and metric function, and a multiple regression analysis method for solving metric function is put forward. By applying a integrating sphere expanded radiation source, a civil camera is calibrated in Lab, and the response function is obtained. The result shows that the proposed method is feasible and practical. At last, the problem about physical meaning of radiation response function and radiometric precision are discussed.

**Key words:** optical remote sensor; space camera; radiometric calibration; radiance retrieval

收稿日期: 2007-05-22; 修订日期: 2007-07-18.

基金项目: 国家 863 高技术计划资助项目 (No. 863-2-5-1-13B)

## 1 引言

随着遥感信息定量化应用的不断发展和推广,对遥感图像产品反映目标景物细节的能力也提出了越来越高的要求,除了对几何分辨力提出更高要求之外,辐射分辨力也越来越受到关注。遥感成像质量的评价正在从地面像元分辨力和光学传递函数相结合的传统评价方法向信噪比、最小可分辨对比度和图像质量方程等国际上新兴的评价方式转变。遥感成像的性能和表现除了与遥感器的光电性能直接相关外,最终成像效果在很大程度上还与辐射定标与校正的方法和精度有关。辐射定标的作用是确定遥感器的辐射响应性能和提供对遥感图像进行辐射校正的依据,而辐射校正则是利用辐射定标的结果把传感器获取的原始数字图像转化成便于解译的目标辐亮度图像,以消除由于像元响应的非线性和像元间响应不一致引起的图像失真或辐射畸变。

本文从遥感成像过程中辐射信息传递和转换的角度分析了影响最终图像数码输出的各种因素,并讨论了光学遥感器的绝对辐射定标及校正方法,采用泰勒级数和矩阵函数的模型描述了“辐射响应函数”的物理概念,并提出了多次回归分析求解矩阵方程获得辐射校正系数的方法。

## 2 辐射定标和校正的必要性分析

空间光学遥感器主要用于获取景物的真实辐射亮度图像。由于遥感器是以数码形式记录和输出图像的,其数码值并不唯一与景物辐射亮度相关,如:大气状况、相机光学系统参数、光谱衰减、光电成像转换以及电子学系统甚至软件等都影响图像数码输出<sup>[2-3]</sup>。实际上,遥感器的最终数码输出除所需要的景物辐射信息外,还包含了那些上述不需要的影响因素。图1表示空间光学遥感器在采集景物图像时辐射信息的传递、转换关系。

如图1所示,遥感器在接收景物辐射亮度的同时,受到大气散射、消光、光学系统的衰减、光电成像转换以及电子学系统等的影

$$DN = f(L_T, L_B, T_A, T_O, R_{CCD}, \beta)$$

其中: $L_T$ :景物辐射亮度;

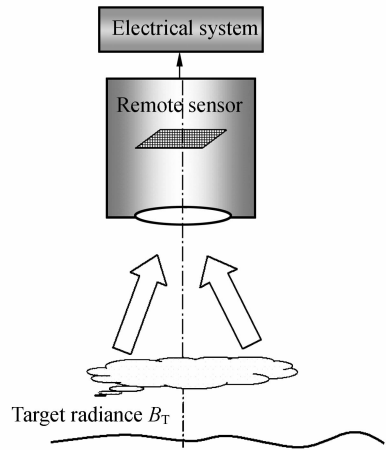
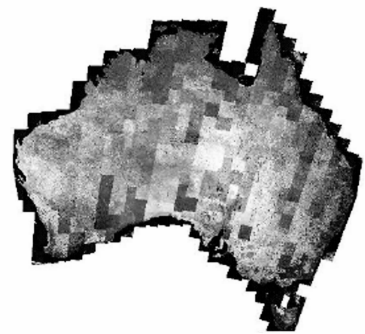


图1 空间光学遥感器在采集景物图像时辐射信息的传递转换关系

Fig. 1 Relation of radiative information transferring and conversion during space optical remote sensor collecting scene picture



(a) 没有经过辐射定标/校正  
(a) Before radiometric calibration



(b) 经过定标/校正反演处理后的效果  
(b) After radiometric calibration

图2 辐射定标反演效果的比较

Fig. 2 Comparison of images before and after radiometric calibration

$L_B$ :大气散射及背景辐射亮度;

$T_A$ :大气透过率;

$T_O$ :光学系统透过率;

$R_{CCD}$ :CCD 光电转换的灵敏度或响应函数;

$\beta$ :电子学系统增益、转换系数。

这些因素的存在将导致相机输出的数码图像与真实景物的辐射亮度图像在层次和幅度对比关系上都会发生严重的变化。辐射定标与反演的目的在于标定和扣除图像数码中的非目标辐射因子,通过校正算法还原出真实的景物辐射亮度图像。

图 2 为一幅真实遥感图像在辐射校正前后的效果比较<sup>[6]</sup>。

### 3 光学遥感器的辐射传递函数与定标

对于光学遥感器而言,影响图像的主要因素是光学系统参数和光电成像器件(如 CCD)的性能,根据相机的辐射传递方程可以分离出影响光电响应性能的因子,通过绝对辐射定标可以定量得到这些因子的量值。

#### 2.1 辐射传递与转换因子

假设遥感器在其瞬时视场内接收的来自目标景物的辐射亮度  $L$ ,在所有成像环节都是线性系统的理想情况下,其图像上对应像元的数码输出  $DN$  可以表示为式(1):

$$DN = L \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 T_O \cdot R_{CCD} \cdot \beta_E \cdot t_{int}, \quad (1)$$

其中, $D/f$ 为光学系统的相对孔径, $T_O$ 为系统的总透过率, $R_{CCD}$ 为 CCD 焦平面探测器的响应度, $\beta_E$ 为电子学系统增益, $t_{int}$ 为积分时间。

将式(1)转换成下列形式:

$$DN = L \cdot F_{O,CCD}, \quad (2)$$

其中, $F_{O,CCD} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 T_O \cdot R_{CCD} \cdot \beta_E \cdot t_{int}$ ,为遥感器的辐射传递与转换函数。

#### 2.2 辐射定标函数

式(1)为遥感器的辐射响应方程,实际上由于光学系统像差、焦平面探测器的响应非线性以及 A/D 转换的非线性等的影响,图像的  $DN$  值和入瞳辐射亮度  $L$  之间并不一定呈严格的线性关系,这时可以用泰勒级数来表示相机数码输出与辐射

亮度关系的辐射响应函数:

$$DN = A_0 + A_1 L + A_2 L^2 + A_3 L^3 + \dots + A_n L^n, \quad (3)$$

其中, $A_0, A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ 是待定标的系数,绝对辐射定标的任务是确定式(3)中的各定标系数。

在式(3)中,常数  $A_0$  的物理含义为焦平面探测器、电子学系统和杂散辐射产生的相机本底输出, $A_1$  为相机的线性响应系数, $A_2, A_3, \dots, A_n$  为二次以上的高次响应系数。

若式(3)中二次项以上系数很小以至于其影响可以忽略,则该遥感器可以简化为满足式(2)的线性响应系统。

当具体应用定标结果对遥感图像进行辐亮度反演时,一般利用式(3)的逆过程,即把某观测条件下的目标等效为入瞳辐亮度表示成图像灰度的函数:

$$L = A_0' + A_1' \cdot DN + A_2' \cdot DN^2 + A_3' \cdot DN^3 + \dots + A_n' \cdot DN^n, \quad (4)$$

其中  $A_0', A_1', A_2' \dots A_n'$  是辐射校正系数,一旦该定标系数被确定,就可以根据这个函数关系和相机的数码输出  $DN$  值反演出相机入瞳处的辐射亮度  $L$ ,最终还原出目标的辐射亮度图像。

### 4 绝对辐射定标和校正方法

在进行辐射定标时,能够满足式(3)的必要条件有三个<sup>[4-5]</sup>:(见图 3 绝对辐射定标的光路原理图)

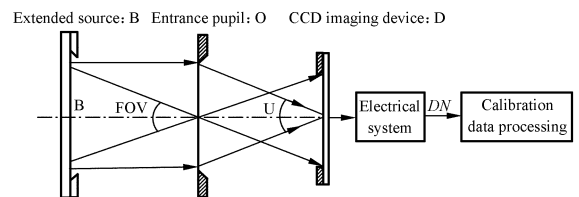


图 3 绝对辐射定标原理图

Fig. 3 Schematic diagram of absolute radiometric calibration

全孔径充满:定标辐射源为扩展辐射源,其面积  $A$  大于被定标相机入瞳面积  $O$ ,并充满相机孔径角,其作用是对相机的所有光学元件照明,满足

“毫无遗漏”的辐射标定要求;

视场充满:如果扩展辐射源发出辐射的发散角大于相机的总视场角,则可在相机的焦平面上产生一个扩展光斑,如果该扩展光源的均匀性和辐射亮度角度分布较为理想,则在该照明光斑下可同时标定出仪器在不同视场下各个像元之间的响应度差异(响应非均匀性)。

端对端:用辐射亮度  $B$  已知的扩展辐射源照明光学系统入瞳,采集遥感器最终的输出信号,标定出包含所有影响相机响应性能的元器件、部件在内的响应函数。

扩展辐射源的辐射亮度必须预先标定,在性能上除满足其面积能够充满相机光学口径的要求外,还应该具有良好的漫射辐射特性和均匀性。

扩展辐射源  $B$  为充满光学系统的视场角和孔径角照明遥感器,并满足从光学系统入瞳的辐射输入到最终的电子学系统输出的端对端定标。

由于积分球光源是目前最为理想的均匀、漫射扩展光源,因此被普遍认为是空间光学遥感器辐射定标的理想扩展光源,图 4 为基于积分球光源的辐射定标原理框图。

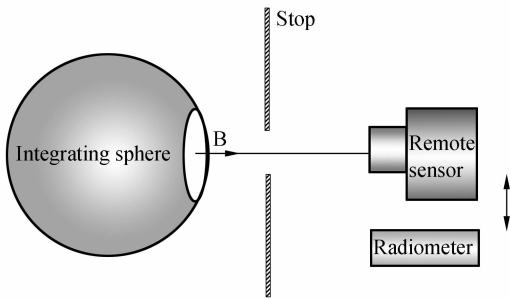


图 4 基于积分球扩展光源的辐射定标工作原理框图  
Fig. 4 Operational principle of radiometric calibration based on integrating sphere extended light source

图 4 中,辐射计是经过国家标准计量部门标准传递和标定的辐射亮度计,用该辐射计可以标定出积分球光源的输出辐射亮度。

将遥感器对准积分球开口,通过改变积分球光源的辐射亮度值  $L$ ,得到一系列式(4)形式构成的方程组,可以用“辐射响应函数矩阵”表示:

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} = \mathbf{A}_0' + \begin{bmatrix} DN_1, DN_1^2, DN_1^3, \dots, DN_1^n \\ DN_2, DN_2^2, DN_2^3, \dots, DN_2^n \\ DN_3, DN_3^2, DN_3^3, \dots, DN_3^n \\ \vdots \\ DN_n, DN_n^2, DN_n^3, \dots, DN_n^n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_1' \\ A_2' \\ A_3' \\ \vdots \\ A_n' \end{bmatrix}$$

由于辐亮度值  $L$  为辐射计预先定标获得的已知量,图像灰度值  $DN$  为相机输出数码,因此求解该矩阵方程能够计算出相机的辐射校正系数  $A_0', A_1', A_2' \dots A_n'$ ,应用这些校正系数可以把遥感器获取的原始数字图像反演成遥感器入瞳前的辐亮度图像,如果再经过大气辐射传输校正就能够得到真正的目标景物亮度图像。

对于式(4),也可以采用多项式回归算法求解。

### 5 辐射定标示例

图 5 为某型号民用 CCD 相机实验室绝对辐射定标结果,通过实验室辐射定标获得了该相机的辐射响应函数:

$$DN = 1.30 + 2.56L$$

该函数给出了相机入瞳处辐射亮度  $L$  与最终输出数码  $DN$  之间的函数关系,通过回归分析得到方程中常数项  $A_0 = 1.30$ ,一次项系数  $A_1 = 2.56$ ,残余误差为 0.017 0,置信度为 0.999 8,因此该响应曲线近似为线性的。

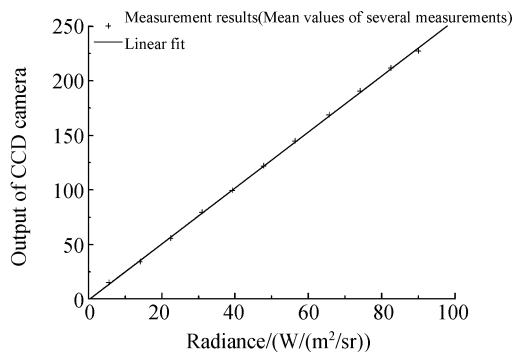


图 5 CCD 相机响应函数曲线  
Fig. 5 Response function of CCD camera

### 6 结 论

上面讨论了光学遥感器单个像元的绝对辐射定标方法,对于图像上任意像元的辐射定标,该方

法依然适用。

在完成所有像元的标定后,通过比较各像元之间的响应度差异,还可以获得遥感器的响应非均匀性,通过分析二次项以上系数可获得响应的非线性关系等。

本文着重描述空间光学遥感器的绝对辐射量

值传递、转换关系以及绝对辐射定标的基本原理和方法,其中辐射定标中光谱响应的影响<sup>[5]</sup>及校正等问题也不容忽略。

绝对辐射定标结果的可靠性主要取决于定标装置的精度和辐射量值的传递精度<sup>[6]</sup>以及相机的输出信噪比等因素。

## 参考文献:

- [1] 贺威,秦其明,付炜. 可见光和热红外辐射定标方法浅述[J]. 影像技术,2005,(1):34-36.  
HE W, QIN Q M, FU W. The superficial study of visible light and infrared calibration [J]. *Image Technology*, 2005,(1): 34-36. (in Chinese)
- [2] 赵贵军,陈长征,万志,等. 推扫型 TDI CCD 光学遥感器动态成像研究[J]. 光学 精密工程,2006,14(2): 291-296.  
ZHAO G J, CHEN CH ZH, WAN ZH, *et al.*. Study on dynamic imaging on push-broom TDI CCD optical remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (2): 291-296. (in Chinese)
- [3] 姜景山. 空间科学与应用[M]. 北京:科学出版社,2001.  
JIANG J SH. *Space Science and Application* [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [4] 崔敦杰. 光学遥感器的辐射定标纪念建所五十周年论文及论文摘要汇编(一)[C]. 长春:长春光学精密机械与物理研究所,2002:148-154.  
CUI D J. Radiometric Calibration of Optical Remote Sensor[C]. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences*. (in Chinese)
- [5] 王淑荣,邢进,李福田. 利用积分球光源定标空间紫外遥感光谱辐射计[J]. 光学 精密工程,2006,14(2): 185-191.  
WANG SH R, XING J, LI F T. Spectral radiance responsivity calibration of ultraviolet remote sensing spectroradiometer in space using integrating sphere[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(2):185-191. (in Chinese)
- [6] WU X L, DANAHAR T. A Landsat 7 calibration base for australia [J]. *SPIE*, 2001, 4548: 109-113.
- [7] 郑玉权. 海洋水色 CCD 成像仪带通响应的光谱辐射校正方法研究[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,1999.  
ZHENG Y Q. *Study on Method for Spectral Radiometric Calibration of Marine Water-color CCD Imager in Band-pass* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 1999. (in Chinese)
- [8] 郑小兵,张黎明,吴浩宇,等. 面向光学遥感的先进光谱辐射定标技术[J]. 海洋科学进展,2004,22(增):16-22.  
ZHENG X B, ZHANG L M, WU H Y, *et al.*. Advanced radiometric calibration techniques for optical remote sensing [J]. *Advances in Marine Science*, 2004, 22(Supp.): 16-22. (in Chinese)

**作者简介:**任建伟(1956—),男,吉林长春人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所高级工程师,研究生导师,主要从事光谱/辐射测试设备的开发研制和光学遥感辐射校正方面的研究。E-mail: Renjw@ciomp.ac.cn