

海洋水色 CCD 成像仪光谱非线性校正

郑玉权 崔敦杰

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

摘 要 一个理想的光学遥感器,在响应波段内光谱响应度是完全平直的,遥感器的输出与入射的辐射成完全的线性关系;而实际的遥感器并非如此,它的光谱响应度在响应波段内并不是平直的,这就使遥感器的输出不仅与入射的辐射有关,还与遥感器的光谱响应度有关,实际测量时,由于目标光谱形状的差异会导致输入与输出之间的非线性关系。利用仪器定标时采用的光源光谱形状与实际测量时目标光谱形状对仪器的输出数据进行校正会有效地减小由于遥感器的光谱响应非均匀性引入的测量误差。文中利用测得的海洋水色 CCD 成像仪的各波段光谱响应度,计算了已归一化为具有相同的带内平均光谱辐亮度的不同温度黑体输出,由输出结果可以看到,不同的光谱形状对海洋水色 CCD 成像仪的输出影响较大,为了减小由此引入的测量误差,文中对实验室定标用积分球光源和海洋水色 CCD 成像仪在轨工作时的典型输入辐亮度的光谱特性进行了等效黑体拟合,并以此为依据计算了海洋水色 CCD 成像仪在轨工作时的光谱非线性修正因子。

关键词 遥感器,光谱响应度,校正,海洋水色

1 引 言

光学遥感器的非线性输出问题已引起很多人的注意,Wack^[1]讨论了 GOES 系列成像仪短波红外波段由于相对光谱响应度的误差引起的非线性输出问题,Weinreb 等^[2]提出了 AVHRR 红外通道的非线性校正方法,而由于遥感器相对光谱响应度非均匀性引起的非线性响应问题却很少提到。

一个多光谱遥感仪器,在每个响应波段内,它的光谱响应度并不是完全均匀的;这就使得遥感器的输出不仅与目标的光谱特性有关,还与仪器的光谱响应度有关,但为了实际需要,我们经常把遥感器的输出与要测量的参量——辐亮度建立直接的关系,这样在仪器的输入与输出之间不可避免地存在光谱非线性关系。当我们利用遥感器进行多光谱测量时,对仪器的光谱非线性输出考虑较少。当然对于波段较窄的光谱遥感仪器,这种影响较小;而对于波段较宽的遥感仪器,仪器的光谱非线性引入的误差是不容忽视的。为了确定光谱非线性对仪器测量结果的影响程度,我们采用测得的海洋水色 CCD 成像仪的相对光谱响应度,计算了海洋水色 CCD 成像仪对不同温度的黑体目标的输出。

海洋水色 CCD 成像仪主要用于中国海洋、近海

大陆架及海岸带的观测,它共有 3 个波段,采用 3 分立镜头结构,测量时 3 个镜头对准同一视场,同时获得目标的多光谱信息。此仪器采用高性能的线列 CCD 探测器件并按推扫方式工作,各波段信噪比均高于 400。海洋水色 CCD 成像仪的带宽较大(90—100 nm),因此光谱非线性响应对其测量结果的影响也较大。为了确定影响的程度,我们首先计算一下海洋水色 CCD 成像仪对具有相同带内光谱辐亮度的不同温度的黑体输出。

2 扩展通带宽度的定义

在计算海洋水色 CCD 成像仪的输出之前,必须确定通带宽度的光谱界限。一般情况下,通带宽度定义为波段的半宽度,即光谱响应度降为峰值的一半时的光谱范围。此定义忽略了半宽度以外的光谱范围内的辐射对遥感器输出的贡献,为此对海洋水色 CCD 成像仪定义了一个扩展通带宽度(Extended band)^[3],即仪器各波段的光谱响应度降为峰值的 1% 时的光谱范围,此范围之外则可视为带外。这一定义主要为了考虑带外校正的需要,表 1 给出了海洋水色 CCD 成像仪不同带宽定义下的边界点和中心波长。

表 1 不同通带宽度定义下的光谱范围和中心波长

Table 1 Spectral range and center wavelength under different definitions of bandwidth

波段/nm	半宽度/nm		扩展通带宽度/nm
	光谱范围	中心波长	光谱范围
430—520	432.6—509.2	470.9	395.5—565.4
580—670	584.1—650.3	617.2	568.0—671.4
760—860	775.6—820.4	798	750.3—891.8

3 海洋水色 CCD 成像仪的输出

海洋水色 CCD 成像仪的输出最终取决于目标的光谱特性及成像仪的光谱响应度,它可由下式给出:

$$S_o = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda)R(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

式中: $L(\lambda)$ 为入射到成像仪光学系统入瞳处的光谱辐亮度; $R(\lambda)$ 为成像仪的光谱响应度; λ_1, λ_2 为扩展通带的边界点。

3.1 理想的光谱响应模型

首先考虑一个理想的遥感器,在响应波段内它的光谱响应度是完全均匀的(图 1)。

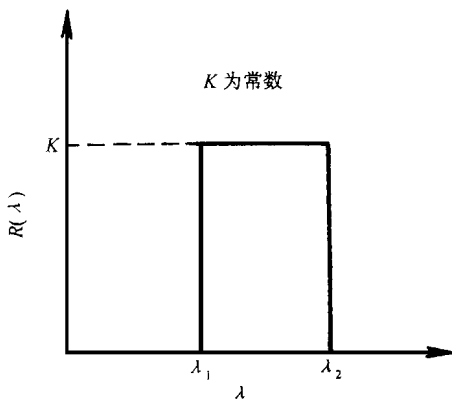


图 1 理想的光谱响应度
Fig. 1 Ideal spectral response

光谱响应函数可表示为:

$$R(\lambda) = \begin{cases} K & \lambda_1 \leq \lambda < \lambda_2 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

则有:

$$S_o = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda)d\lambda = K L(\lambda_k) \Delta\lambda \quad (3)$$

$$\overline{L(\lambda)} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda)R(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda)d\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda)d\lambda}{\Delta\lambda}$$

为波段内的平均光谱辐亮度; $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ 为带宽。此时遥感器的输出不受目标光谱特性的影响,完全取决于入射到入瞳处的平均光谱辐亮度,且与平均光谱辐亮度成线性关系。而遥感器的实际光谱响应度并不是完全均匀的,由此也导致遥感器的输出与入瞳处的平均光谱辐亮度并不呈完全的线性关系。

3.2 实际的光谱响应度

实际遥感器的光谱响应度是不均匀的,随着波长的不同,响应度值呈高低起伏变化。图 2 为海洋水色 CCD 成像仪各波段的相对光谱响应度。这种情况下,成像仪的输出不能表示为平均光谱辐亮度的线性关系。根据式(1)和积分中值定理,存在波长 $\lambda_k \in [\lambda_1, \lambda_2]$ 使下式成立:

$$S_o = R(\lambda_k) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda)d\lambda \quad (4)$$

λ_k 的选取是由目标的光谱特性决定的,光谱特性不同, λ_k 值也不同,则 $R(\lambda_k)$ 值也不同。

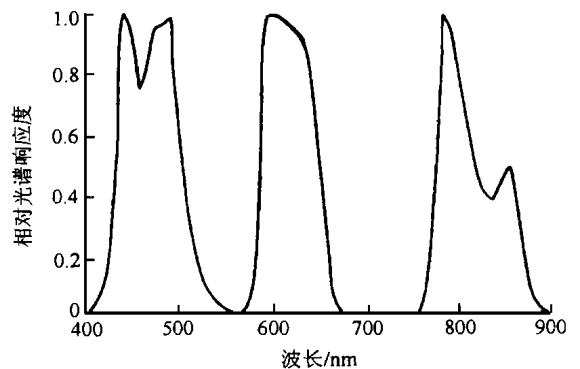


图 2 海洋水色 CCD 成像仪相对光谱响应度
Fig. 2 Relative spectral response of the Ocean Color CCD Imager (OCGI)

选取 2 个光谱辐亮度 $L_1(\lambda)$ 和 $L_2(\lambda)$ 不同,但

平均光谱辐亮度相同 $\overline{L_1(\lambda)} = \overline{L_2(\lambda)}$ 的目标计算海洋水色 CCD 成像仪的输出值, 由式(4)有:

$$S_{o1} = R(\lambda_{k1}) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_1(\lambda) d\lambda = R(\lambda_{k1}) \overline{L_1(\lambda)} \Delta\lambda \quad (5)$$

$$S_{o2} = R(\lambda_{k2}) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_2(\lambda) d\lambda = R(\lambda_{k2}) \overline{L_2(\lambda)} \Delta\lambda \quad (6)$$

由于 $R(\lambda_{k1}) \neq R(\lambda_{k2})$, 显然 $S_{o1} \neq S_{o2}$ 。为了验证其正确性, 我们选取了 1 200 K—38 000 K 的 Planck 函数计算了海洋水色 CCD 成像仪各波段的输出, 计算结果列于表 2。此温度范围内的 Planck 函数既包含了实验室定标用积分球光源的光谱辐亮度特性, 也包含了海洋水色 CCD 成像仪在轨工作时的光谱辐亮度特性。计算时, 不同温度的 Planck 函数均按海洋水色 CCD 成像仪在轨工作时的典型输入辐亮度(表 3)进行了归一化(即通带内的平均光谱辐亮度等于典型输入光谱辐亮度), 归一化后的曲线如图 3。从表 2 可以看出, 带内平均光谱辐亮度相同的情况下, 随着黑体温度的变化各波段的输出明显不同。假设各波段的带内平均输入辐亮度为单位辐亮度, 即 $1 \mu\text{Wcm}^{-2}\text{Sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$, 若仪器采用 3 370 K 的黑体进行定标, 则定标因子分别为 $1.346 / (1 \mu\text{Wcm}^{-2}\text{Sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1})$, $1.096 / (1 \mu\text{Wcm}^{-2}\text{Sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1})$ 和 $1.120 / (1 \mu\text{Wcm}^{-2}\text{Sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1})$, 当遥感器测量带内平均输入

表 2 海洋水色 CCD 成像仪对不同温度 Planck 函数的输出(相对值)

Table 2 Response of OCCI to Planck function at different temperature (Relative value)

温度/K	波段/nm		
	430—520	580—670	760—860
1200	2.035	1.352	1.492
1500	1.866	1.276	1.375
2000	1.653	1.196	1.258
3000	1.402	1.114	1.144
3370	1.346	1.096	1.120
4000	1.257	1.073	1.091
6000	1.119	1.034	1.042
10000	1.021	1.006	1.007
12000	1.000	1.000	1.000
14000	0.986	0.996	0.995
20000	0.963	0.989	0.986
30000	0.947	0.984	0.980
积分球光源	1.324	1.092	1.115

表 3 在轨典型输入辐亮度

Table 3 Typical input radiance of OCCI on orbit

波段/nm	430—520	580—670	760—860
辐亮度/ $\mu\text{Wcm}^{-2}\text{Sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$	19.8	15.1	10.4

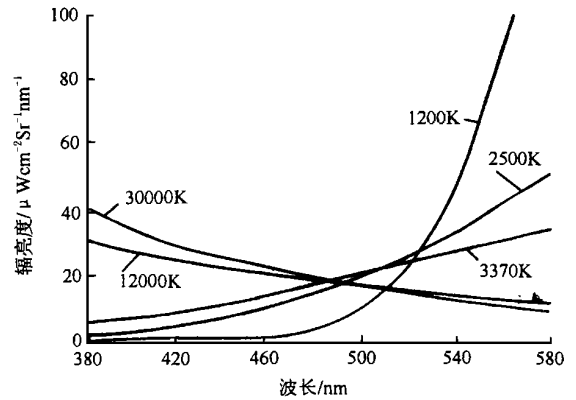


图 3 不同温度的黑体光谱辐亮度形状

(按 430—520 nm 波段典型输入辐亮度归一化)

Fig. 3 Spectral shapes of blackbodies at different temperature 辐亮度为 $1 \mu\text{Wcm}^{-2}\text{Sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ 的 12 000 K 的黑体时的各波段的输出均为 1.000, 若将定标数据直接作用于测得的数据, 计算出各波段的辐亮度分别为 0.723, 0.912 和 0.893 $\mu\text{Wcm}^{-2}\text{Sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$, 与实际辐亮度值相差较大。

4 在轨辐亮度校正因子

4.1 积分球光源等效黑体温度的确定

海洋水色 CCD 成像仪的实验室内辐射定标采用 1.5 m 直径的积分球, 测得的光谱辐亮度^[2]如图 4, 它的峰值辐亮度在波长 860 nm 处, 由维恩位移定律

$$\lambda_m T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (7)$$

可得 $T = 3370 \text{ K}$, 而积分球在 860 nm 处的辐亮度输出不到 3370 K 黑体的 1/10000, 为了便于比较, 我们将 3370 K 黑体的辐亮度输出按 860 nm 处积分球的辐亮度值进行了归一化, 这也可以把积分球看作发射率非常低(<0.0001)的灰体。但它不是一个完全的灰体, 因为它的发射率是随波长变化的, 这可以从图 4 中看出, 在远离 860 nm 的位置上, 2 条曲线并不是重合的。

4.2 在轨辐亮度等效黑体温度的确定

由于海洋水色 CCD 成像仪只有 3 个波段, 用它

们的在轨典型输入辐亮度来拟合轨道光谱特性与实际偏差很大,因此我们采用相似观测条件下的宽视场海洋水色扫描仪(SeaWiFS, 美国)给出的在轨典型输入辐亮度数据^[3],对其在轨工作时的输入辐亮度特性进行了拟合(图 5)。其值在 10000 K, 12000 K 和 14000 K 的黑体之间变化(不同温度的黑体按 412 nm 处的典型输入辐亮度归一化),显然没有一个完美的拟合,但典型输入辐亮度可估计为一个 12000 K 的灰体。

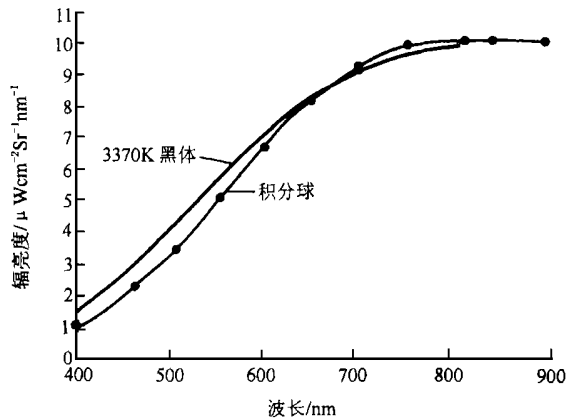


图 4 积分球与等效黑体光谱曲线

Fig. 4 Spectral curves of the integrating sphere and equivalent blackbody

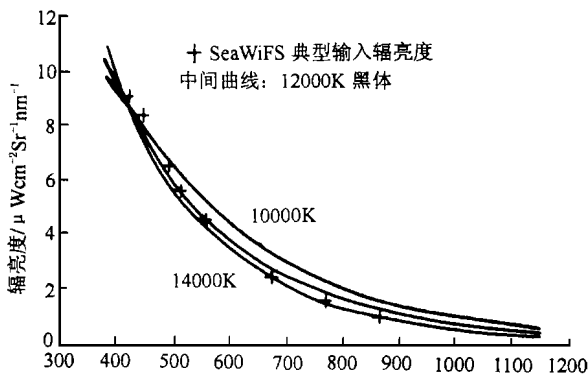


图 5 SeaWiFS 典型输入辐亮度及等效黑体光谱曲线

Fig. 5 Typical input radiance from SeaWiFS and the spectral curve of its equivalent blackbody

4.3 修正因子

从表 4 可以看到,由于实验室内定标用积分球光源与实际测量目标的光谱特性存在着一定的差异,由此引入了海洋水色 CCD 成像仪的测量误差,为了保证辐亮度测量精度,需要对测量结果进行修正。

由于积分球光源的光谱特性可等效为 3370 K 的 Planck 函数,在轨输入辐亮度可等效为 12000 K 的 Planck 函数,从表 2 中查得积分球光源,及 12000K 的 Planck 函数海洋水色 CCD 成像仪的输出,二者的比值即为该波段的修正因子,其值列于表 4。

表 4 海洋水色 CCD 成像仪光谱非线性修正因子

Table 4 Spectral nonlinear correction factor for OCCI

波段/nm	430—520	580—670	760—860
修正因子	1.324	1.092	1.115

实际修正时,定标数据乘以修正因子即为实际测量时的定标数据。

5 结 论

由以上的讨论可以看出,由于海洋水色 CCD 成像仪各波段光谱非均匀性的影响,导致海洋水色 CCD 成像仪的非线性响应,根据室内定标用光源和实际测量时轨道光谱特性对海洋水色 CCD 成像仪进行非线性校正,方法简单方便。但还应看到,文中采用等效黑体温度拟合的方法确定轨道光谱特性,忽略了光谱细节;又由于实际测量目标的复杂性,文中采用的方法仅代表了一种典型状况。若此仪器与其他光谱仪器配合使用,利用实测的光谱数据对海洋水色 CCD 成像仪的输出进行校正将会获得较好的效果。

参 考 文 献 (References)

- 1 Edward C. Wack. SWIR non-linear radiometric response due to errors in relative spectral response. *SPIE*, 1997, **3117**: 217—224.
- 2 M. Weinreb, et al. Nonlinearity Correction in Calibration of Advanced Very High Resolution Radiometer Infrared Channels. *Journal of Geophysical Research*, 1990, **95**(C5): 7381—7388.
- 3 Robert A. Barnes, et al. SeaWiFS Calibration Topics, Part 1. SeaWiFS Technical Report Series. Vol. 39.

作 者 简 介

郑玉权,男,1972 年出生,博士研究生,1993 年毕业于长春光学精密机械学院光学物理系红外专业,1996 年于长春光学精密机械学院获得硕士学位,现就读于长春光学精密机械研究所,主要从事遥感器的研制、定标及遥感图像的处理等方面的工作,已发表论文 3 篇。

Spectral Nonlinearity Correction for Ocean Color CCD Imager

ZHENG Yu-Quan CUI Dun-Jie

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 130022)

Abstract For an ideal multi-spectral remote sensor, there is a completely linear relationship between the output of the sensor and the incident radiation due to the even in-band spectral response; but for an actual sensor, the output of the sensor not only depends on the incident radiation, but also on the spectral response of the sensor, this will result in the nonlinearity between the output of the sensor and the incident radiation. Correcting the output data of the sensor by the use of the spectral shapes of the calibration source and the measured object will effectively reduce the measuring error due to the nonlinear response of the sensor. We have adopted the measured spectral response of Ocean Color CCD Imager (OCCI), and calculated the response of OCCI to blackbodies at different temperatures which have been normalized to have the same in-band average spectral radiance. It can be seen from the calculated results that the spectral shapes have great influence on the output of OCCI. To reduce the measuring error due to the nonlinear response, the nonlinear correction factor has been computed according to the spectral shape of the integrating sphere and the on-orbit spectral shape for OCCI ocean measurement, which can fit a 12000 K blackbody.

Key words Remote sensor, Spectral response, Correction, Ocean color