

# 基于光谱靶标的光学遥感器退化特性 在轨评估方法研究

李 鑫<sup>1,2</sup> 张黎明<sup>1,2</sup> 陈洪耀<sup>1,2</sup> 徐伟伟<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031  
<sup>2</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** 多光谱遥感器在轨运行期间,受化学分子污染、发射振动、宇宙辐射等因素的影响,其光谱响应特性会发生变化,使目标物理量的测量值产生偏差,且不能用辐射定标进行校正,影响数据产品序列的一致性。提出了一种基于光谱靶标的光谱响应退化特性在轨评估方法,通过建立响应函数退化模型,并利用光谱靶标反射率在检测波段内呈非线性变化的特性来实现对光谱响应函数退化情况的量化评估。模拟仿真与外场实验结果初步验证了本文方法的有效性,该方法在提高辐射定标精度和优化遥感器设计等方面有重要意义。

**关键词** 遥感;光谱定标;多光谱相机;光谱响应函数;光谱靶标

**中图分类号** TP79; O433.4 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0628002

## On-Orbit Assessment of Optical Sensor degradation Based on Spectral Tarps

Li Xin<sup>1,2</sup> Zhang Liming<sup>1,2</sup> Chen Hongyao<sup>1,2</sup> Xu Weiwei<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** When the multispectral remote sensor is working in the space, it will be affected by the contamination of chemical molecules, vibration during launch, radiation from space and etc. Its spectral characteristic will be degraded by time. As a result, bias will show in the physical measurement and cannot be rectified by radiometric calibration, which will affect the constancy of the data products. An on-orbit degradation assessment method is proposed, which is based on spectral targets. By establishing the degradation model of response function and using the nonlinear reflectance of spectral targets, quantitative assessment of the degradation can be achieved. The results of the simulation experiment and in-flight experiment verify the effectiveness of this method. The method has great significance in improving the accuracy of radiometric calibration, optimizing the camera design and other aspects of remote sensing.

**Key words** remote sensing; spectral calibration; multispectral camera; spectral response function; spectral tarps

**OCIS codes** 280.4788; 110.4234; 150.1488; 110.2990

## 1 引 言

不同地物目标具有不同的光谱反射率特征,多

光谱遥感是利用多光谱扫描系统或摄影系统在不同的波段区域内获得地物影像的遥感技术。该遥感技

**收稿日期:** 2013-12-16; **收到修改稿日期:** 2014-02-10

**基金项目:** 国家自然科学基金(41301374)、国家 863 计划(2012AA12A302-2)、安徽省自然科学基金(12080805Qd74)

**作者简介:** 李 鑫(1983—),男,博士研究生,主要从事光学遥感卫星光谱响应函数校正方面的研究。

E-mail: lixin123@mail.ustc.edu.cn

**导师简介:** 张黎明(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学遥感器辐射定标与标准传递等方面的研究。

E-mail: lmzhang@aiofm.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

术不仅可以根据目标的形态和结构识别地物,还可以根据其光谱特性的差异来实现对目标的分类,大大增加了遥感影像的信息量,从诞生之日起便在环境污染监测、自然灾害评估、农作物生长观察、水体监测等方面发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。光谱响应函数表征了传感器成像系统的光谱响应特性,它是连接入瞳光谱辐亮度与遥感影像灰度值的重要函数,与传感器辐射定标系数密切相关。

传感器在轨运行期间,受发射振动、元件老化、化学分子污染等因素的影响,其光谱响应特性会产生变化,进而使目标物理量的探测值与真值产生偏差,影响数据产品的进一步开发使用,这在长期观测MODIS和AVHRR的数据中已经显现。

人们在对MODIS探测器C5数据的定量分析中发现,Terra与Aqua<sup>[2-3]</sup>的归一化植被指数(NDVI)数据和气溶胶数据存在不一致性的情况,使得综合分析地面目标的长期变化趋势困难。Rob Levy认为测量值的偏差来自于漫射板的BRDF特性的退化,但缺乏有力的佐证,因此不能排除传感器光谱响应函数退化而导致的误差。ERTS-1星载MSS在轨运行期间,其定标数据也产生了退化,John等<sup>[4]</sup>分析认为,某些碳氢化合物污染了镜头,该因素导致了测量数据的退化。Willart-Soufflet等<sup>[5]</sup>证明了真空会导致SPOT探测器的带宽变窄,使测量数据产生偏差。Kogan等<sup>[6]</sup>通过对AVHRR系列卫星NDVI的长期观测数据的分析发现,在卫星寿命的后期,即使进行发射后辐射定标校正,大多数植被的NDVI值依然存在15%的偏差。由此可以得出结论,尽管卫星传感器带有严格的保护装置,但由于化学分子污染与元件老化等原因带来的光谱响应退化依然无法避免。

Wang Dongdong等<sup>[7]</sup>通过对MODIS的C5数据序列的分析,使用二阶多项式的方法建立了NDVI的退化模型,并应用于对C6数据的校正。Kogan等<sup>[8-9]</sup>则通过高斯函数模型来模拟辐射定标系数的退化趋势,这些方法均需要长时间序列的观测数据,并且只是经验性校正,没有具体的物理基础。实验室测量光谱响应函数方法是利用单色仪或可调谐激光器进行逐波段扫描,并使用标准探测器作为传递标准,最后插值得到完整波段的光谱响应函数,该方法虽然精度很高但不能应用于在轨检测。MODIS虽然配备有强大的高精度星上定标系统,可以进行光谱和辐射定标,但对所有传感器配置这样的星上定标系统是不现实的,而且星上定标系统也

会产生衰变,影响定标精度。

本文提出了一种基于人工光谱靶标的传感器光谱响应函数退化效应的在轨评估方法,通过建立响应函数的退化模型来实现对退化状况的定量化评估,该方法适用于高分辨率的多光谱传感器,在提高辐射定标精度和优化传感器设计等方面有重要意义。

## 2 在轨评估算法

### 2.1 基于灰阶靶标的地表反射率反演

灰阶靶标的特点是,反射率在光谱方向上是平坦的,且在不同靶标间呈比例,在遥感影像上,灰阶靶标表现为一组响应值呈线性变化的目标。利用经验线性法<sup>[10]</sup>,将灰阶靶标的响应值按反射率进行线性拟合,即可求解得到反射率定标系数。遥感影像的覆盖范围相对于大气作用尺度来讲属于微扰,因此可认为影像中大气条件保持不变,将反射率定标系数应用于其他目标灰度值即可反演得到对应的等效反射率,实现大气校正。反演流程如图1所示。

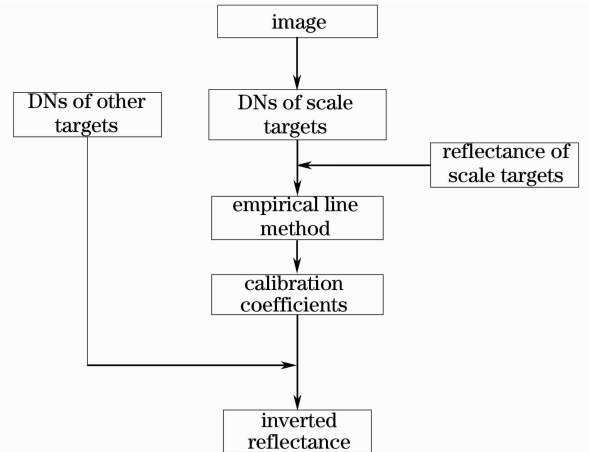


图1 基于灰阶靶标的反射率反演流程

Fig.1 Flow of surface reflectance inversion based on scale targets

### 2.2 基于光谱靶标的在轨评估方法

多光谱相机的成像物理过程可以表示成下面的形式:

$$D_{N-tar} = \int \frac{E_g(\lambda)R_{tar}(\lambda, \theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v)}{\pi} T(\lambda)S(\lambda)d\lambda + D_{N-a,g} + D_{N-0}, \quad (1)$$

式中 $D_{N-tar}$ 为目标的响应值, $E_g(\lambda)$ 为到达目标的光源光谱辐照度, $R_{tar}(\lambda, \theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v)$ 为地面目标双向反射比, $T(\lambda)$ 为由目标到遥感器的大气透射率, $D_{N-a,g}$ 为大气程辐射与地气耦合辐射形成的响应值, $D_{N-0}$ 为遥感器暗电流。

利用灰阶靶标反演的目标反射率可以表示为

$$\hat{R} = \frac{\int E_g(\lambda) R_{\text{tar}}(\lambda) T(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int E_g(\lambda) T(\lambda) S(\lambda) d\lambda}. \quad (2)$$

由该式可以看出,反演反射率与遥感器光谱响应函数  $S(\lambda)$  密切相关,当响应函数产生变化时,反演反射率也会产生变化。遥感器退化后的反演反射率可以表示为

$$\hat{R}^* = \frac{\int E_g(\lambda) R_{\text{tar}}(\lambda) T(\lambda) S^*(\lambda) d\lambda}{\int E_g(\lambda) T(\lambda) S^*(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

式中  $S^*(\lambda)$  表示退化后的光谱响应函数。响应函数的退化可能有很多形式,如带宽的缩放、中心波长的漂移和带内响应度的变化等,其中响应度的变化是最难以描述的,退化响应函数  $S^*(\lambda)$  与未退化响应函数  $S(\lambda)$  的关系可以表示为

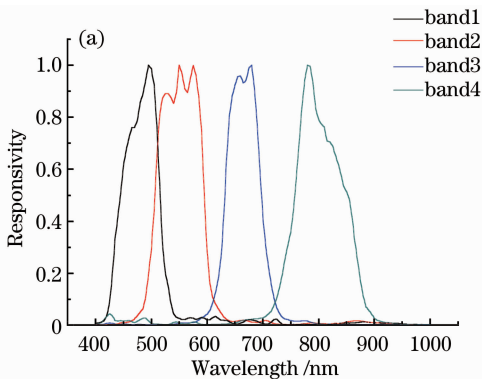
$$S^*(\lambda) = f(\lambda) S(a\lambda + b), \quad (4)$$

式中  $a$  为正数,表示响应函数带宽的缩放, $a < 1$  为展宽, $a > 1$  为缩小。 $b$  为中心波长的漂移量, $b < 0$  为红移, $b > 0$  为蓝移。 $f(\lambda)$  为权重模式变化函数,本文认为其带内响应度权重模式随波长呈线性变化,于是可以表示为

$$f(\lambda) = \begin{cases} c\lambda & \lambda_{\min} < \lambda < \lambda_{\max}, \\ 1 & \text{others} \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$  为原始响应函数的有效带宽。对响应函数退化特性进行评估就是确定参数  $a, b, c$  的过程,本文利用退化前后检测参照的反射率偏差进行求解,即目标函数设置为

$$f(a, b, c) = \operatorname{argmin}_{a, b, c} \sqrt{\sum_{i=1}^4 (\hat{R}_i - \hat{R}_i^*)^2}, \quad (6)$$



式中  $\hat{R}_i, \hat{R}_i^*$  分别为第  $i$  个检测参照反演得到的退化前后反射率,  $\operatorname{argmin}_{a, b, c}(x)$  表示调整参数  $a, b, c$  使  $x$  最小。如果使用光谱平坦的灰阶靶标作为检测参照,此时目标光谱反射率  $R_{\text{tar}}(\lambda)$  为常数,于是(2)式与(3)式的结果可以表示为

$$\hat{R} = \frac{R_{\text{tar}} \int E_g(\lambda) T(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int E_g(\lambda) T(\lambda) S(\lambda) d\lambda} = R_{\text{tar}}, \quad (7)$$

$$\hat{R} = \frac{R_{\text{tar}} \int E_g(\lambda) T(\lambda) S^*(\lambda) d\lambda}{\int E_g(\lambda) T(\lambda) S^*(\lambda) d\lambda} = R_{\text{tar}}. \quad (8)$$

两者是相等的,即反演反射率不能随响应函数的退化而改变,所以必须使用反射率呈非线性变化的光谱靶标作为检测参照。(6)式中共有 3 个未知数,使用四组以上检测参照数据,才能利用最小二乘法实现求解。

### 3 仿真模拟

IKONOS 多光谱相机各通道光谱响应函数形状模式差异较大,为有效检验本文方法的普适性,使用该相机作为模拟实验对象。为检验光谱响应函数退化对地物反演反射率的影响,本文从 USGS 地物波谱库中选择了 21 种典型地物的波谱数据作为测试样本。模拟实验使用的探测器光谱响应函数和测试样本光谱反射率曲线如图 2 所示:。

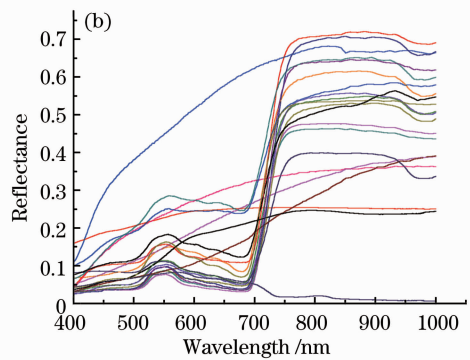


图 2 IKONOS 相机光谱响应函数(a)和典型地物光谱反射率曲线(b)

Fig. 2 Response functions of IKONOS (a) and reflectance of typical objects (b)

在原始响应函数的基础上添加退化效应,其中  $a$  设置为 0.6,  $b$  设置为 -8,  $c$  设置为 6.1, 利用 Modtran 模拟不同条件下的大气透射率与太阳辐照

度<sup>[11]</sup>, 利用(2), (3)式求解得到退化前后的各目标的等效反射率  $\hat{R}$  和  $\hat{R}^*$ , 并进行比较。

表 1 退化前后典型地物反射率偏差

Table 1 Deviation of reflectance before and after degradation

	Max ( $\Delta R$ )	Mean ( $\Delta R$ )
Band1	0.0302	0.0135
Band2	0.0276	0.0133
Band3	0.0764	0.0439
Band4	0.021	0.0101

由表 1 可以看出,当响应函数产生退化时,典型地物的反演反射率将产生较大的偏差,且无法用传统的辐射定标的方法来进行校正,这是因为传统辐射定标过程是以大面积均匀场为检测参照的,类似于灰阶靶标,其光谱反射率接近于常数,由(7),(8)式可得,反演反射率不能随响应函数的退化而改变,因此不能实现对反演反射率偏差的校正。

在本文的评估方法中使用的光谱靶标是由人工专门制作的光谱检测参照,现共有 15 种样品,经检测均具有良好的朗伯特特性,其光谱反射率曲线如图 3 所示。

对原始的光谱响应函数添加多种退化效应,参数  $a$  变化范围为 $[0.5, 2]$ ,即带宽从放大一倍变化到

表 2 本文方法对退化效应的检测

Table 2 Degradation detectability of the method proposed

	Max ( $\Delta a$ )	Mean ( $\Delta a$ )	Max ( $\Delta b$ )	Mean ( $\Delta b$ )	Max ( $\Delta c$ )	Mean ( $\Delta c$ )
Band1	$5 \times 10^{-4}$	$3.38 \times 10^{-6}$	$5.6 \times 10^{-3}$	$9.43 \times 10^{-5}$	$1.9 \times 10^{-3}$	$4.71 \times 10^{-5}$
Band2	$1.8 \times 10^{-5}$	$6.44 \times 10^{-7}$	$2.21 \times 10^{-3}$	$9.56 \times 10^{-5}$	$8.76 \times 10^{-3}$	$2.22 \times 10^{-4}$
Band3	0.188	0.0142	0.930	0.464	3.64	0.4255
Band4	$4.46 \times 10^{-5}$	$8.74 \times 10^{-7}$	$5.86 \times 10^{-3}$	$4.42 \times 10^{-5}$	0.007945	$4.9 \times 10^{-5}$

由上表可以看出,由于在第三通道呈非线性变化的光谱靶标数量不能满足 2.2 节中评估原理的需求,因此除第三通道外,其他通道拟合得到的退化系数与输入值的最大偏差与平均偏差均较小,所以本文提出的基于光谱靶标的评估方法可有效实现对遥感器退化效应的检测。

在实际应用中,为减少实验成本,需要从现有靶标样品中选择出少量样品制作成大面积检测参照。综合考虑各种因素,最终选择了红绿蓝黄四种样品,经模拟验证,可以有效实现光谱响应函数退化效应的检测。

## 4 外场实验

### 4.1 光谱靶标与在轨实验

为满足外场检测实验的需要,研制了红黄绿蓝灰阶,共 5 类 6 种大面积人工光谱靶标,如图 4 所示。光谱靶标是根据工业标准色卡的特性,专业制

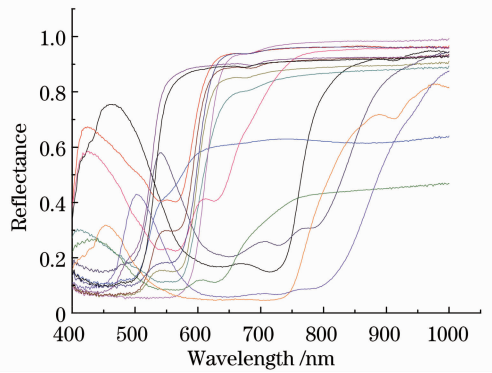


图 3 光谱靶标样本反射率曲线

Fig. 3 Reflectance curves of spectral target samples  
缩小一倍。参数  $b$  变化范围为 $[-10, 10]$ ,即中心波长从红移 10 nm 到蓝移 10 nm,参数  $c$  的变化范围为 $[-10, 10]$ ,即从短波方向的偏重到长波方向的偏重。将生成的退化响应函数  $S^*(\lambda)$ ,以及光谱靶标反射率代入到(2),(3)式,得到退化前后的靶标反射率  $\hat{R}, \hat{R}^*$ ,代入到目标函数(6)式中,利用最小二乘法求解  $a, b, c$ ,通过比较求解值与输入值的绝对偏差( $\Delta a, \Delta b, \Delta c$ ),来检验本文算法对响应函数退化的评估能力。

作的大面积外场实验用检测参照,由于使用了性质优良的 PU 革和防水涂料,人工靶标具有良好的光学特性与理化特性。2012 年 9 月,中国科学院安徽光学精密机械研究所实验人员于黑龙江进行了在轨实验检测。

在实验过程中,使用太阳光度计(CE318)来实现大气透射率的测量,并使用 Langley 法来计算得



图 4 大面积光谱靶标

Fig. 4 Deployed spectral Targets



到大气光学厚度<sup>[12]</sup>,使用自动气象站来实时测量当地气象数据,结果如表 3 所示。在过顶前后较短时间内,利用野外光谱辐射计对光谱靶标和周围典型

地物的光谱反射率进行测量,并利用标准白板的 BRDF 数据进行校正,测得的光谱靶标反射率曲线图 5 所示。

表 3 气象数据

Table 3 Meteorology data

Temperature / °C	Pressure / hPa	Humidity / %	Visibility / km
20.67	990	54.94	23

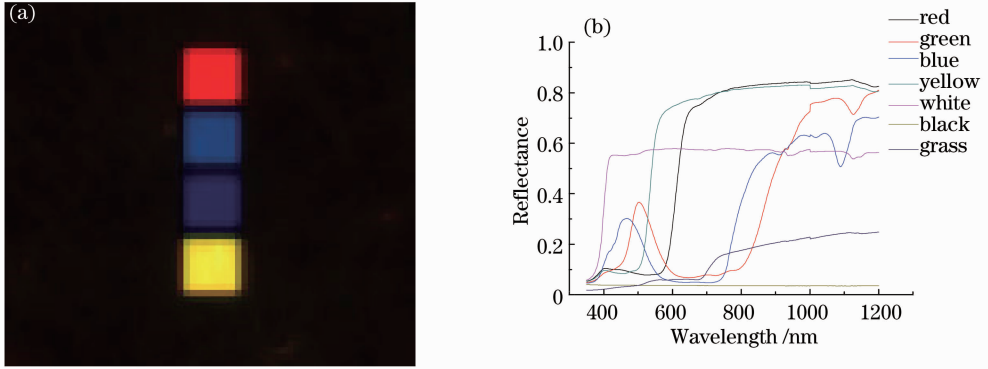


图 5 遥感影像与光谱靶标反射率曲线

Fig. 5 Image and spectral reflectance of targets

结合测得的相关数据,使用 Modtran 进行辐射传输计算,得到卫星入瞳处的光谱辐亮度、大气透射率、大气程辐射与地气耦合辐射。

结合辐射传输计算得到的地面光谱辐照度、大气透射率和光谱靶标反射率,利用(2)式计算得到的等效反射率如表 5 所示。

#### 4.2 数据分析与处理

表 5 光谱靶标计算反射率

Table 5 Calculated reflectance of spectral targets

	Red	Green	Blue	Yellow
Band1	0.091	0.282	0.266	0.115
Band2	0.093	0.216	0.104	0.550

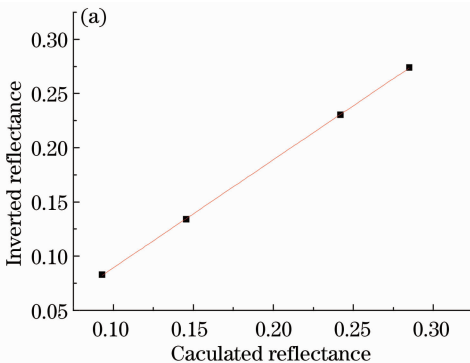
经检测,遥感影像的第三与第四通道存在非线性响应,因此本文只对第一和第二通道进行检测。首先,利用灰阶靶标反演得到各个光谱靶标的等效反射率,如表 4 所示。

表 4 光谱靶标反演反射率

Table 4 Inverted reflectance of spectral targets

	Red	Green	Blue	Yellow
Band1	0.083	0.274	0.230	0.134
Band2	0.089	0.182	0.087	0.574

由表 4 和表 5 可得,第一通道最大反射率偏差大于 0.03,第二通道大于 0.034,大于噪声引起的偏差,说明这两个通道的响应函数存在一定的模式变化。



利用本文的方法对这两个通道的退化效应进行评估,求解得到的退化因子如表 6 所示。

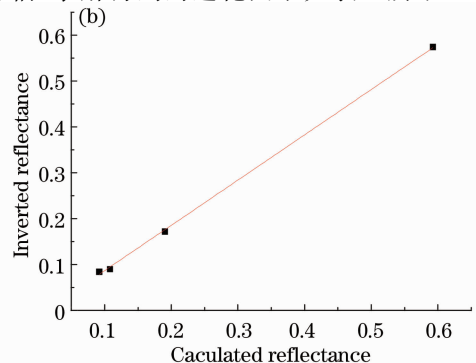


图 6 重新计算反射率与反演反射率的关系

Fig. 6 Relationship between recalculated and inverted reflectance

表 6 求解得到的退化因子

Table 6 Degradation coefficients calculated

	$a$	$b$	$c$
Band1	0.756	-2.147	3.248
Band2	0.868	-3.72	6.973

由表 6 可以看出,检验得到的退化效应较小,这是因为传感器在轨运行时间较短,光学元件的退化较小。

将校正系数应用于原始函数,重新计算得到的反射率与反演反射率的关系如图 6 所示。

第一通道与第二通道反演反射率与计算反射率的相关系数利用退化系数重新计算后,相关系数分别为:0.999,0.999,两通道的相关系数均比较高。对实验场地附近典型地物反射率,如草地、水泥公路、玉米等,利用相同的方法进行重新计算,评估前两通道最大相对偏差分别为:0.130,0.146,评估后最大相对偏差为:0.052,0.122,说明本文得到的退化系数是有效的。

## 5 结 论

提出了基于人工光谱靶标的传感器光谱响应特性的在轨评估方法,通过线性函数的方法建立了响应函数退化模型,该模型只有三个参数,大大简化了光谱靶标的需求量,降低了求解复杂度,该方法适用于各种高分辨率的多光谱传感器,对于提高辐射定标精度、评估空间环境对探测器光学特性的影响,以及优化传感器设计等有重要意义。

当响应函数权重出现比较复杂的变化时,如出现多峰,则可以在本文方法的基础上添加多个三角波,此时待解参量数目会增加,所需布设的靶标数量也会增加,同时对光谱靶标反射率特征的要求也会相应提高,这将是下一步研究工作。

实验将光谱靶标应用于外场定标计算,得到的只是初步结果,想得到进一步详细精确的结果,还需要布设更多的光谱靶标,并进行多次的外场实验,利用长时间序列的遥感影像数据进行验证。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Futao, Wang Shixin, Zhou Yi, *et al.*. Application and prospect of multi-spectral remote sensing in major natural disaster assessment [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(3): 577-582.
- 2 王福涛,王世新,周艺,等.多光谱遥感在重大自然灾害评估中的应用与展望[J].*光谱学与光谱分析*, 2011, 31(3): 577-582.
- 3 S Djavidnia, F Melin, N Hoepffner. Comparison of global ocean colour data records [J]. *Ocean Science*, 2010, 6(1): 61-76.
- 4 R C Levy, L A Remer, R G Kleidman, *et al.*. Global evaluation of the collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(21): 10399-10420.
- 5 John J Horan, Daniel S Schwartz, James D Love. Partial performance degradation of a remote sensor in a space environment, and some probable causes [J]. *Appl Opt*, 1974, 13(5): 1230-1237.
- 6 V Willart-Soufflet, R Santer. Using AVIRIS for in-flight calibration of the spectral shifts of SPOT-HRV and of AVHRR [C]. *JPL, Summaries of the 4th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, AVIRIS Workshop*, 1993. 197-200.
- 7 F N Kogan, X Zhu. Evolution of long-term errors in NDVI time series. 1985~1999 [J]. *Adv Space Res*, 2001, 28(1): 149-153.
- 8 Dongdong Wang, Douglas Morton, Jeffrey Masek, *et al.*. Impact of sensor degradation on the MODIS NDVI time series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 119(1): 55-61.
- 9 Zhai Wenchao, Li Jianjun, Zheng Xiaobing, *et al.*. Research on method of calibrating sun channel of sun radiometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0412004.
- 10 翟文超,李健军,郑小兵,等.太阳辐射计直射通道实验室定标方法研究[J].*光学学报*, 2012, 32(4): 0412004.
- 11 Wu Jing, Yang Weiping, Feng Jie. Method of estimating spectral response of commercial digital still camera [J]. *Journal of Yunnan Normal University*, 2006, 26(5): 43-44.
- 12 吴静,杨卫平,冯洁.一种测量商业数码相机光谱响应的方法[J].*云南师范大学学报*, 2006, 26(5): 43-44.
- 13 E Karpouzli, T Malthus. The empirical line method for the atmospheric correction of IKONOS imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(5): 1143-1150.
- 14 Fu Qiang, Xiangli Bin, Jing Juanjuan. System Signal-to-noise ratio analysis based on imaging chain model in multispectral remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0211001.
- 15 付强,相里斌,景娟娟.基于多光谱遥感成像链模型的系统信噪比分析[J].*光学学报*, 2012, 32(2): 0211001.
- 16 F Biggar, D I Gellman, P N Slater. Improved evaluation of optical depth components from langley plot data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 32(2): 91-105.

栏目编辑:殷建芳