

光学遥感器光谱响应特性在轨评估中的光谱靶标设计

李 鑫^{1,2} 张黎明^{1,2} 陈洪耀^{1,2} 徐伟伟^{1,2}

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031
² 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 光学遥感器在轨运行期间,受温度变化、空间辐射等因素的影响,其光谱响应特性会产生变化,进而使目标物理量的测量值产生退化。以光谱靶标为检测参照,通过建立合适的退化模型,可以实现对遥感器光谱响应特性的在轨评估。为达到这一目的,需要针对遥感器的光谱响应函数设计出合适的光谱靶标,通过仿真模拟计算,得出了光谱反射率呈高斯模式的光谱靶标最适合进行在轨评估的结论,在轨实验结果初步验证了设计结果的正确性。

关键词 遥感; 光谱定标; 多光谱相机; 退化效应; 光谱靶标

中图分类号 TP79; O433.4 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0728002

Design of Spectral Target Used to Assess the Degradation of Multi-Spectral Sensor in Flight

Li Xin^{1,2} Zhang Liming^{1,2} Chen Hongyao^{1,2} Xu Weiwei^{1,2}

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

Abstract When the multi-spectral sensor works in the space, it is affected by temperature variations, space radiation and other factors, which may produce changes in the spectral response characteristics. As a result, bias occurs in the physical measurements which cannot be corrected by radiometric calibration methods. With the help of spectral targets and appropriate degradation models, the degradation characteristics of the multi-spectral sensor can be assessed. To achieve this purpose, suitable spectral targets should be designed. Based on simulation experiments, it can be concluded that the targets with Gauss model spectral reflectance are the most suitable for on-orbit assessment, and the on-orbit experiment result verifies the conclusion above.

Key words remote sensing; spectral calibration; multi-spectral camera; spectral response function; degradation effect; spectral targets

OCIS codes 280.4788; 110.4234; 150.1488; 110.2970; 120.0280

1 引 言

多光谱遥感技术利用多光谱扫描或摄影技术来获取同一地物目标不同谱段的图像,该技术扩大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、农作物生长监测等方面发挥着重要作用^[1]。辐射定标是遥感数据量化应用的前

提,光谱响应函数反映了成像系统的光谱响应特性,与遥感器辐射定标过程密切相关。遥感器在轨运行期间,受发射振动、温度变化等因素的影响,光谱响应特性会产生退化,进而使目标物理量的探测值与真值产生偏差,严重影响数据产品的量化应用,这在中分辨率成像光谱仪(MODIS)和探测仪器

收稿日期: 2014-01-15; **收到修改稿日期:** 2014-02-19

基金项目: 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,博士,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

(AVHRR)的长期观测数据中已经显现。

Djavidnia 等^[2-3]在对 MODIS 探测器 C5 数据的定量分析中发现, Terra 与 Aqua 测量的归一化植被指数(NDVI)数据和气溶胶数据存在不一致的情况。Levy 等^[3]认为误差来自于星上漫射板的双向反射分布(BRDF)特性的退化, 但该假定缺乏有力的佐证, 因此不能排除遥感器光谱响应函数退化导致的误差。Kogan 等^[4]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。Vermote 等^[5]通过使用海洋上空的云和沙漠两种方法对 AVHRR/NOAA-9, 11 的第一, 第二通道进行了绝对辐射定标, 发现第一通道定标数据存在不一致性, 经分析认为第一通道的有效中心波长存在 17 nm 的红移, 该结论通过对澳大利亚气溶胶数据的测量得到了验证。由此可见, 虽然卫星遥感器带有严格的保护装置, 但由于污染与元件老化等原因带来的光谱响应函数退化依然无法避免。

实验室测量光谱响应函数是利用单色仪或可调谐激光器进行逐波段扫描, 最后通过插值得到完整波段的响应函数^[6-7], 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, 但对所有遥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, 如 Mekler 等^[8]通过对 AVHRR/NOAA9, 7 长时间序列定标数据的分析, 认为扫描镜受到了星际尘埃的污染, 最终导致了定标数据的退化。在实验室测量数码相机响应函数的过程中, 人们提出了基于反射率呈非线性变化的标准色卡的评估方法, 取得了很好的效果。该方法也可以用于对遥感器退化效应的在轨评估, 但色卡光谱反射率非线性变化的具体要求还不是很明确, 因此本文通过仿真计算的方法, 得出了作为检测参照的目标光谱反射率应满足的一些必要量化条件, 经外场实验验证, 取得较好的效果。该方法对于优化人工光谱靶标的制作以及提高辐射定标精度有重要的指导意义。

2 响应函数退化模型与反射率模型

2.1 响应函数的退化模型

多光谱相机的成像物理过程可以表示为

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

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, θ_s, ϕ_s 分别为光源入射的天顶角和方位角, θ_v, ϕ_v 分别为遥感器观测天顶角与方位角。 $T(\lambda)$ 为由目标到遥感器的大气透射率, $D_{N-a, a-g}$ 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。

利用经验线性法反演得到的目标反射率可以表示为^[9]

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

由(2)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。遥感器退化后的目标反演反射率可以表示为

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

式中 $S^*(\lambda)$ 为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, $a < 1$ 表示展宽, $a > 1$ 表示缩小。 b 为中心波长的漂移量, $b < 0$ 表示红移, $b > 0$ 表示蓝移。 $f(\lambda)$ 为权重调节函数, 可认为其带内响应度权重模式随波长呈线性变化, 即

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

式中 $(\lambda_{min}, \lambda_{max})$ 为原始响应函数的有效带宽, 对响应函数退化进行评估就是确定参数 a, b, c 的过程。 \hat{R}_i, \hat{R}_i^* 分别为第 i 个光谱靶标反演得到的退化前后反射率, 当 \hat{R}_i, \hat{R}_i^* 偏差较大时, 可以使用最小二乘法实现对退化因子的求解。如果使用光谱平坦的灰阶靶标作为检测参照, 由于目标的光谱反射率为常数, (2)式与(3)式可以转化为

$$\hat{R} = \frac{\int E_g(\lambda) R_{tar}(\lambda) T(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int E_g(\lambda) T(\lambda) S(\lambda) d\lambda} = \frac{R_{tar} \int E_g(\lambda) T(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int E_g(\lambda) T(\lambda) S(\lambda) d\lambda} = R_{tar}, \quad (6)$$

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

可见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才能实现退化效应的估计。如果光谱靶标选择不合适,则 \hat{R}_i, \hat{R}_i^* 偏差不大,对响应函数

的退化不敏感,也不能实现有效评估,甚至可能得到错误的结论,因此,必须选择和设计出具有合适光谱反射率特征的光谱靶标作为检测参照。

2.2 光谱靶标光谱形状模型设计

由(2)式和(3)式可得,若使目标的反演反射率随响应函数退化而产生较大的偏差,检测参照的光谱反射率必须在检测波段内呈非线性变化。通过参考现有的工业标准色卡与典型地物光谱反射率,这里使用线性函数和阶梯函数,高斯函数来表示目标反射率在检测波段内的形状模式,如图1所示。

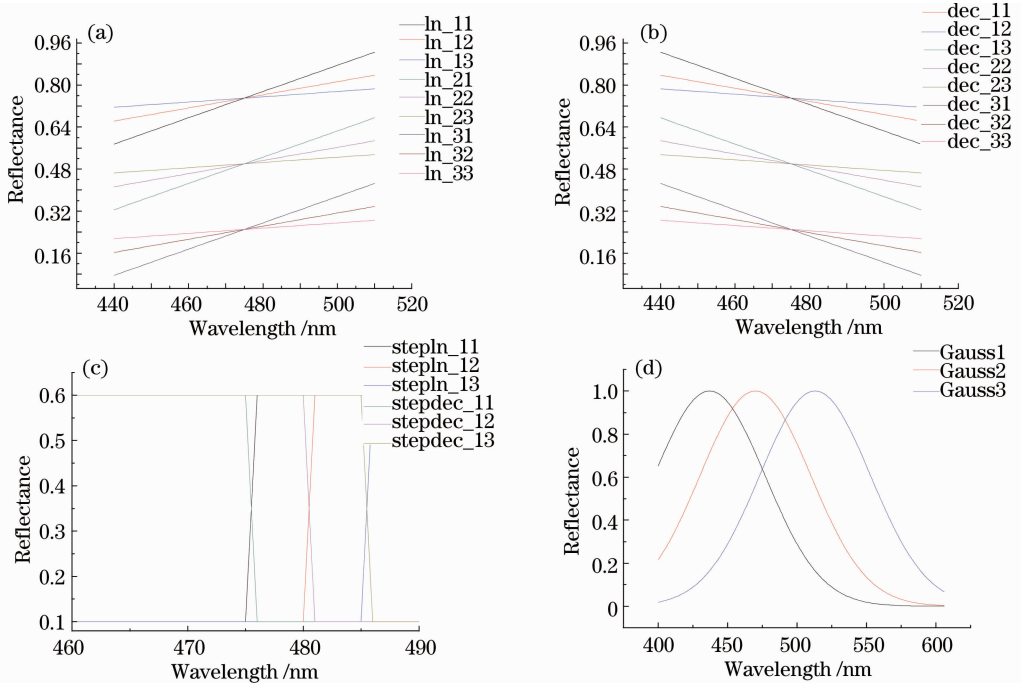


图1 反射率模型

Fig. 1 Models of target reflectance

童庆禧等^[10]通过对多种典型地物光谱反射率的统计分析,总结出多光谱遥感的适应波段范围分别为440~510 nm, 530~620 nm, 630~700 nm, 740~800 nm。通过对现有的遥感器响应函数进行调研,可以发现均满足这一规律,且函数形状呈线类矩形的模式,因此使用矩形函数作为标准响应函数,如图2所示。某些遥感器响应函数可能呈现三角函数或其他函数的形式,均可以使用(4)式添加退化效应方法来得到。

为标准响应函数添加各种退化效应,得到退化响应函数 $S^*(\lambda)$,结合模拟的各种反射率模型,代入到(2)式、(3)式,求解得到退化前后的反射率 \hat{R}_i, \hat{R}_i^* ,比较 \hat{R}_i, \hat{R}_i^* ,当两者存在偏差时,即可以认为该偏差是由响应函数的退化导致的,可以利用最小二乘法对退化情况进行评估。结合一般遥感影像的

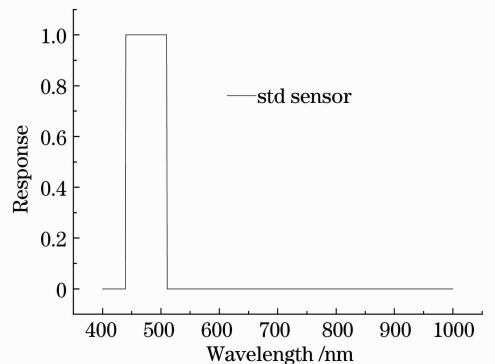


图2 标准响应函数

Fig. 2 Standard spectral response

信噪比和数据产品后续处理对反射率偏差的要求^[11-12],将0.01作为判断反射率模型是否可以用于在轨评估的有效阈值。

2.3 仿真求解

利用(4)式,为标准响应函数添加各种退化效应,其中 a 的变化范围为 $[0.5, 2]$,即带宽从放大1倍到缩小为 $1/2$, b 的变化范围为 $[-10, 10]$,即从红

移10 nm到蓝移 10 nm, c 的变化范围为 $[0.1, 10]$,即从短波方向的偏重到长波方向的偏重,分别结合(2)式和(3)式,求解退化前后反射率的偏差,如表1~3所示。

表1 线性上升反射率模型产生的偏差
Table 1 Bias of linear increase model

		ln_11	ln_12	ln_13	ln_21	ln_22	ln_23	ln_31	ln_32	ln_33
a	Min	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Max	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
b	Min	0.010	0.005	0.002	0.010	0.005	0.002	0.010	0.005	0.002
	Max	0.050	0.025	0.010	0.050	0.025	0.010	0.050	0.025	0.010
c	Min	0.008	0.004	0.002	0.008	0.004	0.002	0.008	0.004	0.002
	Max	0.049	0.025	0.010	0.049	0.025	0.010	0.049	0.025	0.010

表2 线性下降反射率模型产生的偏差
Table 2 Bias of linear decrease model

		dec_11	dec_12	dec_13	dec_21	dec_22	dec_23	dec_31	dec_32	dec_33
a	Min	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Max	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
b	Min	0.010	0.005	0.002	0.010	0.005	0.002	0.010	0.005	0.002
	Max	0.050	0.025	0.010	0.050	0.025	0.010	0.050	0.025	0.010
c	Min	0.008	0.004	0.002	0.008	0.004	0.002	0.008	0.004	0.002
	Max	0.049	0.025	0.010	0.049	0.025	0.010	0.049	0.025	0.010

表3 阶梯与高斯反射率模型产生的偏差
Table 3 Bias of step and Gauss model

		stepln_11	stepln_12	stepln_13	stepdec_21	stepdec_22	stepdec_23	ref_Gauss1	ref_Gauss2	ref_Gauss3
a	Min	0.000	0.004	0.007	0.000	0.004	0.007	0.003	0.018	0.003
	Max	0.004	0.040	0.076	0.004	0.040	0.076	0.065	0.227	0.065
b	Min	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.023	0.000	0.023
	Max	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.117	0.041	0.117
c	Min	0.017	0.016	0.015	0.017	0.016	0.015	0.020	0.004	0.020
	Max	0.104	0.101	0.095	0.104	0.101	0.095	0.126	0.024	0.126

由表1~3可以看出,对于带宽的变化,Gauss2形式的反射率模型产生的反射率差异最大;对于中心波长的漂移,阶梯函数和 Gauss1, Gauss3形式的反射率模型产生的反射率偏差均满足要求,但后两者的偏差最大;对于权重模式的变化,阶梯函数与 Gauss1, Gauss3形式的反射率模型产生的偏差满足要求,但后两者的偏差最大。因此考虑所有因素,高斯模型是最适于进行退化效应评估的反射率模型,且要求在响应波段范围内存在 Gauss1 和 Gauss2,或 Gauss2 和 Gauss3 的检测参照,这在实际操作中是可以实现的。下面还需要确定高斯模型相关参量的详细取值范围,如中心波长、标准方差、大小等。

设计多个高斯模式的反射率曲线,中心波长变化范围为 $[350, 800]$,方差变化范围为 $[10, 100]$,标准响应函数退化因子的变化范围与上文相同,结合

(2)式和(3)式,求解退化前后反射率偏差,其与中心波长和标准方差关系如图3所示。

由图3可以看出,反射率偏差与高斯模型中心波长和标准方差呈非线性关系。在实际应用中,可以首先从三个等值线图中确定中心波长的重合部分,再根据等值线图找到对应的标准方差阈值,从而选择出合适的光谱靶标。不同的遥感器响应函数有不同的形状模式,于是有不同的等值线图,因此在对不同的遥感器进行在轨检测时,需要选择不同的光谱靶标。

如果使用(4)式的退化模型,则待解参数有3个,因此在实际应用中,至少需要4个光谱靶标才能实现有效求解,这些靶标的光谱反射率可以表现为连续上升的模式和连续下降的综合模式,且至少有一个带内高斯模式。根据该结论,研制了多种光谱

靶标样品,经检测,其光谱反射率在多光谱遥感波段内均呈类高斯变化。对于不同的遥感器,可以从中

挑选出少量的合适样本制作成大面积外场实验用检测参照,用于外场检测实验。

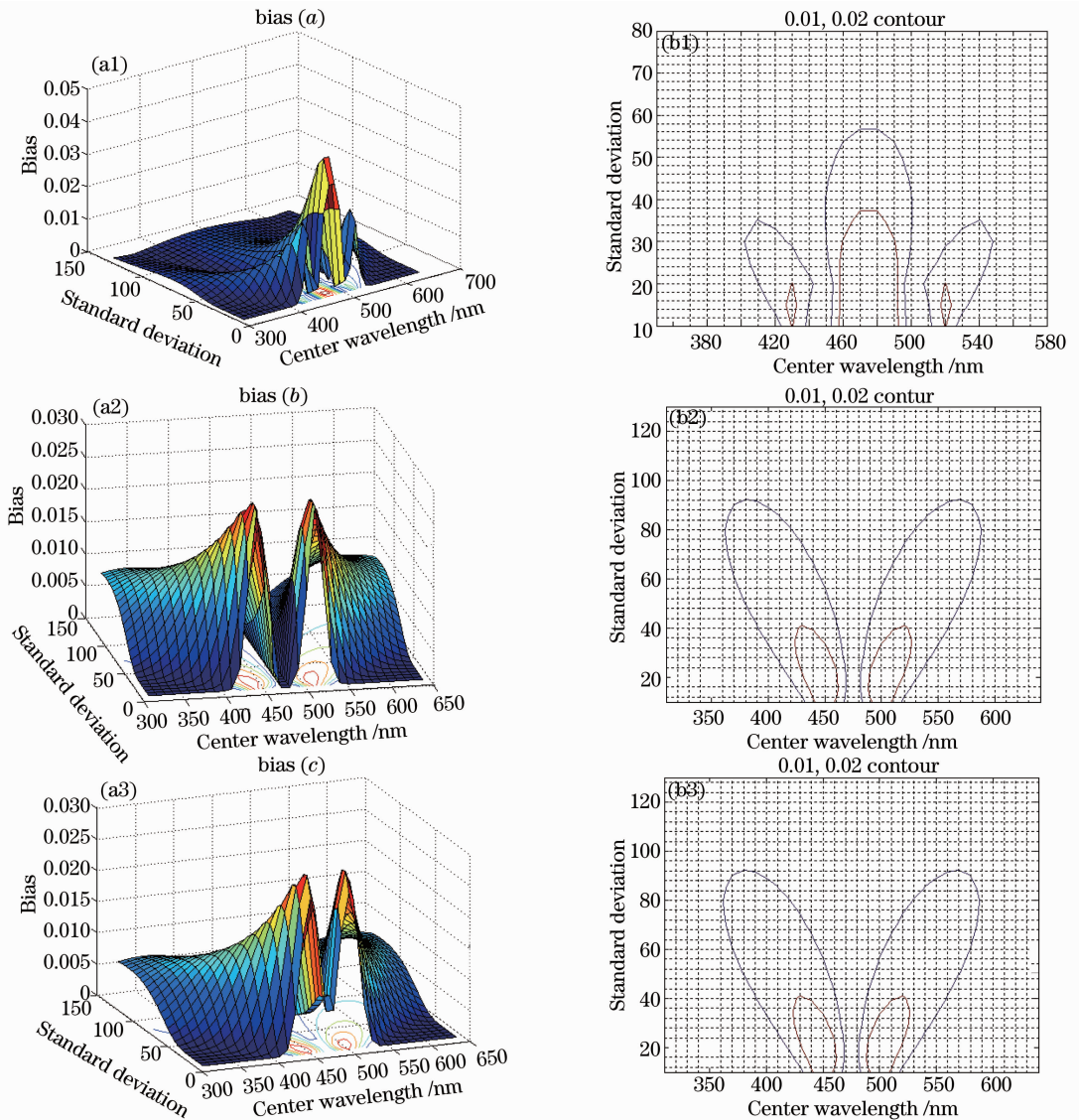


图3 (a1)~(a3)不同退化因子反射率偏差与中心波长和标准方差的关系;(b1)~(b3) 0.01 反射率偏差的等值线
Fig. 3 (a1)~(a3) Relation between bias from different degradation coefficients and center-wavelength, standard deviation; (b1)~(b3) contour line of 0.01

3 外场实验验证

2012年9月,安徽光学精密机械研究所实验人员利用光谱靶标于黑龙江省肇庆市对资源卫星进行了在轨实验检测,如图4所示,实验共进行两天,现场共布设有红绿蓝黄灰阶,五类六种大面积人工光谱靶标,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,本节将以此次实验数据对第2节结论的正确性进行验证。

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

到大气光学厚度,使用自动气象站来实时测量当地气象数据,结果如表4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,并利用标准白板的双向反射分布函数(BRDF)数据进行校正,测得的光谱靶标反射率曲线如图5(b)所示。

结合测得的相关数据,使用大气辐射传输模型(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。

由图5可以看出,只有第二通道波段范围内存



图 4 大面积光谱靶标

Fig. 4 Deployed spectral targets

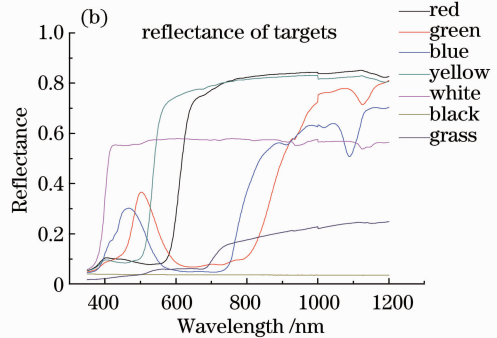
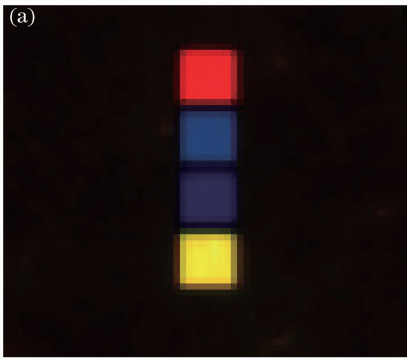


图 5 遥感影像与光谱靶标反射率曲线

Fig. 5 Image and spectral reflectance of targets

表 4 气象数据

Table 4 Meteorology data

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Pressure /hpa	Humidity /%	Visibility /km
20.67	990	54.94	23

在高斯模式的光谱靶标,因此对该通道进行退化评估。将该通道的光谱响应函数按第 2 节的方法进行模拟计算,得到高斯模型反射率偏差与中心波长、标准方差的关系,如图 6 所示。

对各光谱靶标进行高斯函数拟合,得到中心波长与相关系数,并从等值线图中查找到标准偏差的取值范围,结果如表 5 所示。

表 5 光谱靶标拟合参数与本文方法要求范围

Table 5 Parameters of spectral targets and requirement of the method proposed

	Blue	Green	Yellow-red
Center	470.020	510.183	573.192
Sigma	44.261	33.153	32.243
R^2	99.500	98.300	99.200
Sigma range obtained	(44,74)	(8,73)	(0,50)

由表 5 可以看出,光谱靶标的标准偏差满足本文方法的要求。

将测量得到的光谱靶标反射率,辐射传输计算得到的地表太阳辐照度与大气透射率代入(2)式和

(3)式中,求得反射率 \hat{R}_i ,结合反演反射率 \hat{R}_i^* ,代入到下面的目标函数中

$$f(a,b,c) = \operatorname{argmin}_{a,b,c} \sqrt{\sum_{i=1}^3 (\hat{R}_i - \hat{R}_i^*)^2}, \quad (8)$$

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。最终拟合得到的退化因子如表 6 所示。

表 6 第二通道计算得到的退化因子

Table 6 Calculated degradation coefficients of band 2

	a	b	c
Band 2	0.858	-3.339	7.001

由表 6 可以看出,该通道存在红移和一定的展宽,以及一定的向长波方向的权重变化,这应该是由发射振动与温度变化共同作用的结果。将系数应用于原始响应函数,结合(3)式,求解得到同步测量的一些典型地物的等效反射率,与由灰阶靶标反演得到的反射率相比较,结果如图 7 所示。

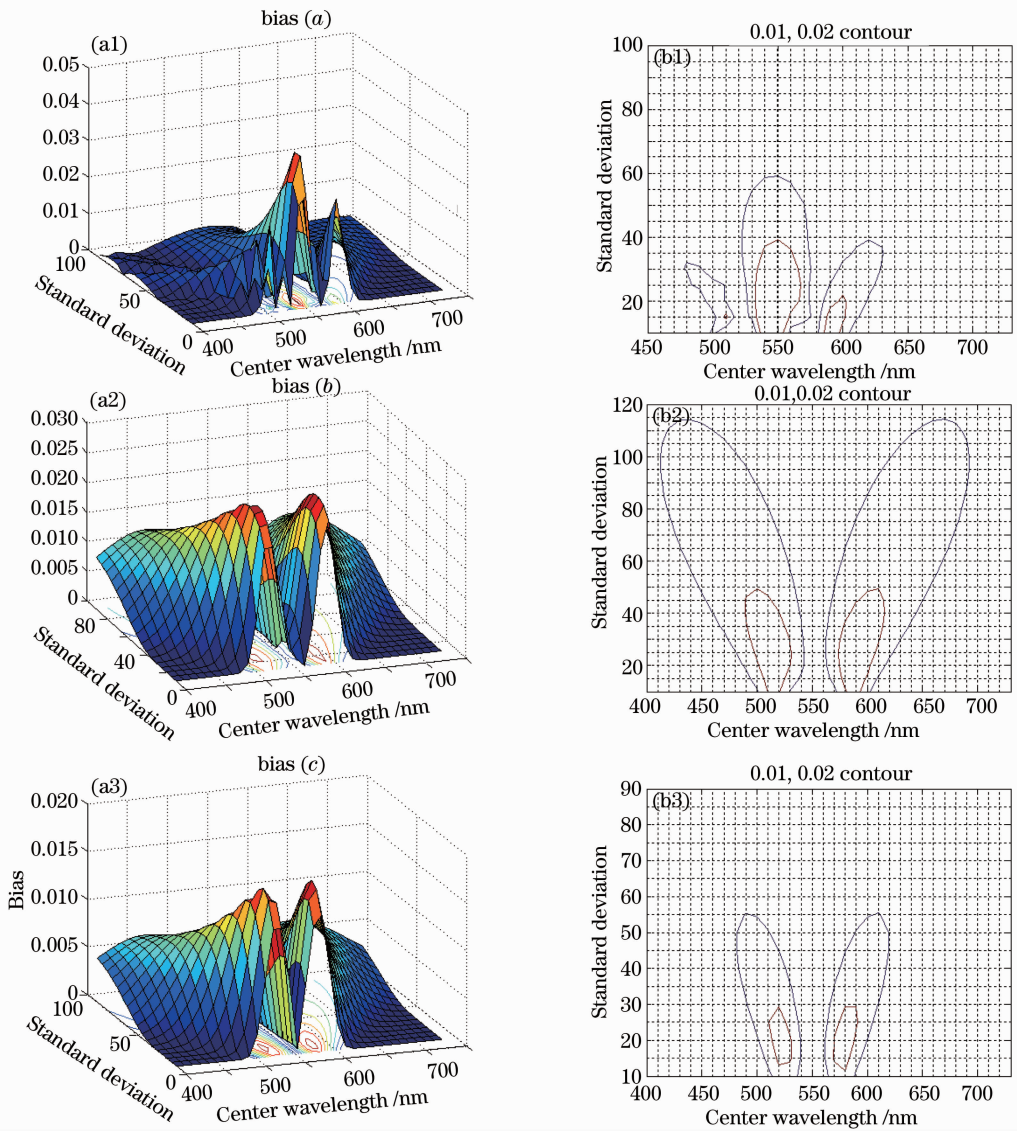


图 6 (a1)~(a3)第二通道响应函数得到的偏差与中心波长和标准方差的关系；(b1)~(b3) 0.01 反射率偏差的等值线
 Fig. 6 (a1)~(a3) Relation between bias from band 2 response function and center-wavelength, standard deviation; (b1)~(b3) contour line of 0.01

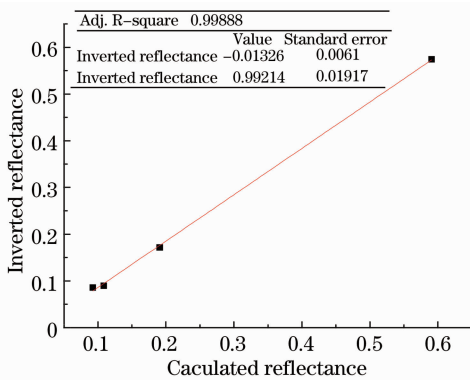


图 7 重新计算反射率与反演反射率的关系
 Fig. 7 Relation of inverted and recalculated reflectance

重新计算后,第二通道反演反射率与计算反射率的相关系数为 0.999,可见相关性非常高。选择

靶标周围的草地,公路,玉米地等典型地物,按相同的方法对结论进行验证,未添加退化因子之前,该通道最大相对偏差为 0.146,添加退化因子后为 0.119。偏差得到有效降低,说明求解得到的退化因子是有效的,也证明了选择的光谱靶标模式是正确的。第一通道受大气程辐射影响较大,且满足要求的光谱靶标数量较少,因此不能实现全部参数的求解,经验证,通过对缩放因子的校正可以将最大相对偏差由 0.130 减少到 0.08。第四通道经检验存在非线性响应。对于第三通道,由于在该通道内没有高斯类型的光谱靶标,因此经退化因子修正后的相关系数只有 0.95,相关度较低,说明解算得到的退化因子是无效的,因此没有高斯类型的光谱靶标,不

能实现对退化特性的评估。

由表 6 可得, 遥感器光谱响应特性的退化比较低, 这是因为遥感器在轨运行比较短, 受空间环境影响较小。当在轨运行时间较长时, 通过本文选择的光谱靶标, 可以有效实现对响应函数退化效应的检测, 这对于提高遥感器使用寿命和数据产品的精度有重要意义。

4 结 论

本文确定的光谱靶标选择方法, 不仅可以应用于在轨遥感器退化特性的评估, 还可应用于航空相机的在轨检测, 该方法还可以评估遥感器退化对不同反射率模式的地物检测的影响, 这对于合理使用遥感器数据具有重要意义。

响应函数权重模式的变化是比较复杂的, 而且很容易与漂移形成相同的退化效果, 在这里建立的退化模型中, 响应函数权重变化模式是线性的, 该方法降低了问题的复杂性和对光谱靶标数量的要求, 提高了退化因子的解算精度。当使用其他的退化模型时, 所需求的光谱靶标数量可能会有所增加。

由于光谱靶标首次应用于外场实验, 因此解算得到的结果只是一个初步的结果, 要想得到更加详细精确的结果, 还需要对解算方法进行优化并进行多次的在轨检测实验。另外这里得到的光谱靶标选择与设计结论, 是建立在响应函数没有带外光谱泄露的基础上的, 要想实现对带外响应的检测, 还需要进一步优化光谱靶标的设计, 这将是下一步的研究工作。

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.

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.

2 S D Javidnia, F Melin, N Hoepffner. Comparison of global ocean colour data records [J]. Ocean Science, 2010, 6(1): 61-76.

3 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.

4 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.

5 E Vermote, Y J Kaufman. Absolute calibration of AVHRR visible and near-infrared channels using ocean and cloud views [J]. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(13): 2317-2340.

6 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.

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.

7 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.

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.

8 Yuri Mekler, Yoram J Kaufman. Possible causes of calibration degradation of the advanced very high resolution radiometer visible and near-infrared channels [J]. Appl Opt, 1993, 34(6): 1059-1062.

9 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.

10 Tong Qingxi, Tian Guoliang, Mao Yalan. Methodology study of spectral band selection for multispectral remote sensing [J]. Journal of Astronautics, 1983, 4(2): 1-13.

童庆禧, 田国良, 茅亚澜. 多光谱遥感波段选择方法的研究[J]. 宇航学报, 1983, 4(2): 1-13.

11 David James Fleming. Effect of Relative Spectral Response on Multi-Spectral Measurements and NDVI from Different Remote Sensing System [D]. Washington: University of Maryland, College Park, 2006. 48-50.

12 Fu Qiang, Xiang Libin, 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.

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.

栏目编辑: 殷建芳