



遥感信息质量提升的源端方法及其地学-光电参量关联物理基础

晏磊^{1,4}, 姜凯文¹, 樊邦奎², 郑玉泉³, 王明志⁵, 勾志阳^{1,6}, 胡秀清⁷, 左正康¹, 付瑜¹, 赵红颖^{1*}

1. 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 空间信息集成与3S工程应用北京市重点实验室, 北京 100871;
2. 北京市信息技术研究所, 北京 100094;
3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;
4. 桂林航天工业学院, 广西高校无人机遥测重点实验室, 桂林 541004;
5. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100190;
6. 北京普达迪泰科技有限公司, 北京 100089;
7. 国家卫星气象中心, 北京 100081

* E-mail: zhaohy@pku.edu.cn

收稿日期: 2020-02-08; 接受日期: 2020-04-27; 网络版发表日期: 2020-10-20

国家重点研发计划(编号: 2017YFB0503003)、高等学校博士学科点专项科研基金(编号: 20130001110046)、高端外国专家项目(编号: GDW20131100006)和国家高技术研究发展计划(“863”计划)(编号: 2008AA121806)资助项目

摘要 遥感信息质量提升是高分辨率遥感定量化发展的基础和追求目标. 本文提出了一种从成像系统源端提升遥感信息质量的新方法, 实现了地学-光电参量的相互转换, 通过连续调整成像传感器光电参量使得地物观测影像误差最小化, 即提升遥感信息质量. 具体是通过外场定标实验获得的影像 DN 值, 利用地物 L 的校正模型 $DN=kL+g$, 调整光电参量使得真实拟合系数 k 逼近1和偏差 g 逼近0, 此时影像 DN 值接近地物真值 L . 进一步地, 当 k 偏离1, g 偏离0时, 地物观测误差增大, 仪器退化. 然后根据光电参量分解方程可得到仪器退化的具体部件, 得以跟踪仪器性能并进行改进. 以此建立的地学-光电参量转换遥感成像载荷品质度量、研发新机制, 建立地表参量与成像系统光电参量有效关联, 从光电成像系统源头破解遥感成像误差难以等效度量的难题. 理论和实验证明其有效可行.

关键词 遥感信息质量, 地学-光电参量转换, 传感器, 外场定标, 观测误差, 仪器退化

1 引言

现代社会中, 随着遥感在各领域应用的逐步深入, 高分辨率遥感数据的定量化已成为遥感技术进一步发

展的必然趋势. 同时成像光谱仪图谱合一的特征, 提供了更为丰富的地球表面信息, 拓宽了遥感信息定量获取新领域, 广泛应用于农业、军事、环境监测和森林调查等. 但是定量化的前提是通过成像光谱仪输出的

引用格式: 晏磊, 姜凯文, 樊邦奎, 等. 遥感信息质量提升的源端方法及其地学-光电参量关联物理基础. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 65–77
Yan L, Jiang K W, Fan B K, et al. The source-end method of remote sensing information quality enhancement and the physical basis of geoscience-photoelectric parameters connection (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 65–77, doi: 10.1360/SST-2020-0031

灰度图像能够反演真实的地物物理参量, 而这在很大程度上取决于仪器定标的精度^[1~4]. 此外, 由于环境、温度、外界冲击等影响和成像光谱仪自身光学、器械、探测器性能变化, 其系统响应会发生变化^[5]. 这也需要对成像光谱仪定期定标以修正中心波长位置、通道带宽和辐射定标系数等参数^[6,7]. 因此实验室的定标参数并不能直接应用于航空航天载荷室外运行状态^[8~11], 故需要进行外场定标. 勾志阳等人^[12]提出了利用地面光谱吸收靶标对成像光谱仪进行光谱定标. 段依妮等人^[13]提出利用外场定标和图像统计对航空影像进行相对辐射校正, 以校正影像的整体不均匀性和条带噪声. 段依妮等人^[14]提出利用灰度目标进行外场相对辐射定标, 其精度满足绝对辐射定标的要求. 陈伟等人^[15]提出利用基于反射率的方法对飞行状态的机载多光谱成像仪进行绝对定标. 刘李等人^[16]提出基于深度学习的在轨卫星传感器绝对辐射定标新方法.

由于无人机具有低成本、更高灵活性、维护操作简单和可在危险区作业等优势, 将成像光谱仪搭载在无人机上成为了遥感数据获取的新技术手段. 但是无人机的特点(飞行速度、轻型化、小型化)要求载荷具有适应性的设计, 因此本文建立了针对无人机载荷的遥感综合验证场, 并研究了基于无人机验证场的外场光谱和辐射定标. 通过外场光谱发现了仪器760 nm波长处误差来自中心波长偏移和宽带退化, 进而影响反射率反演结果. 通过外场辐射定标建立了地物校正模型, 但其采用的辐射定标模型普遍为黑箱模型^[17], 模型参数与成像系统的光电物理参量没有明确的对应关系, 无法表达成像系统各部件的参数对成像过程的影响^[18], 因此无法从成像系统源端克服由于高分辨率观测技术带来的误差影响, 目前只能靠遥感成像后续软件来进行有限的补偿, 而不能从成像系统源端为遥感信息质量的提升提供物理基础.

针对以上问题, 本文提出了遥感信息质量提升的两个源端方法: (1) 利用外场光谱定标反演仪器光谱通道的中心波长和带宽以修正偏移, 提升反射率反演结果的质量; (2) 深入研究成像系统的成像过程, 构建由成像参数直接表达的辐射定标模型, 即光电参量分解模型, 并与外场辐射定标建立的地物校正模型联立实现地学-光电参量转化, 以此连续调整光电参量使得影像DN值逼近地物真值 L . 基于这两种方法, 可进行仪器性能跟踪及成像质量改善.

2 建立定标场并实现地物校正模型

2.1 无人机遥感载荷地面定标场建设

光谱与辐射定标是遥感信息质量保障的基础. 虽然通过实验室内光谱辐射定标可检测相机主要的光谱辐射性能指标, 并获得辐射定标的基本参数. 但是由于仪器在飞行前需要经过运输、安装和调试以及飞行中所受的大气条件影响, 仪器的光谱参数会发生相应的变化. 如果沿用实验室的光谱辐射定标数据, 遥感信息的品质将难以保证. 自2008年起, 勾志阳等人^[19]建立了含辐射-光谱-空间-时间4个分辨率监测能力的无人机遥感载荷综合定标场, 设计并布设了辐射靶标、时间靶标、光谱靶标和几何靶标. 其中辐射靶标用于绝对辐射定标, 即设计5~6级反射率不同且呈渐变趋势变化的辐射均一靶标(图1). 光谱靶标包括多光谱相机光谱性能评价靶标及高光谱场地光谱定标验证靶标. 靶标光谱曲线要求不平缓, 各靶标之间有一定光谱差异, 相关性小, 同时有很好的朗伯性, 实物图如图2(a)所示. 高光谱定标验证靶标共有4种类型, 每种尺寸为15 m×15 m的光谱刃边靶标研制, 可满足5 km飞行高度、多个波段的成像光谱仪的光谱定标精度验证. 光谱刃边靶标对光谱带宽不敏感, 可在地面以通用的ASD (Analytical Spectral Devices, Inc)便携式地物光谱仪等野外光谱辐射计进行光谱反射率测量, 实物图如图2(b)所示.

考虑到仪器定标应具备对载荷总体性能的评价能力, 本文拟选人工靶标为主, 自然靶标为辅的靶标方

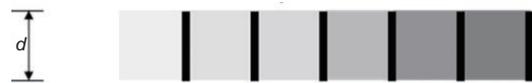


图1 (网络版彩图)辐射特性靶标设计

Figure 1 (Color online) Design of radiation characteristics target.



图2 (网络版彩图)光谱性能评价靶标实物图(a)和高光谱验证靶标实物图(b)

Figure 2 (Color online) Spectral performance evaluation target (a) and hyperspectral verification target (b).

案. 自然靶标指利用自然界中已有地物来进行某种参数的验证. 本文分别选取操场、沙漠、农田三种地物各三块区域作为自然靶标, 图3为裸土-自然靶标及实测光谱.

2.2 无人机观测载荷外场定标等效方程构建

采用上述4类靶标构建完整的无人机观测载荷外场定标校正体系, 即基于地面光谱靶标的光谱定标^[19]和场地绝对辐射定标.

利用人工特征光谱靶标对成像光谱仪进行飞行中光谱定标的数学模型表示为

$$\rho_{ij}^{rc} = \frac{u}{\rho_{ij}^s} \int \rho_{ij}^{r,t}(\lambda) f_{ij}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

$$\rho_{ij}^t = \frac{DN_{i,j,t} - DN_{i,j,0}}{DN_{i,j,s} - DN_{i,j,0}}, \quad (2)$$

式中, DN 为成像光谱仪测量数值, ρ 代表反射率, 下标 i 和 j 分别表示第 j 成像位置的第 i 光谱通道, t 和 s 分别表示对特征参照体和标准参照体测量, u 为归一化因子.

$\rho_{ij}^{r,t}(\lambda)$ 为由超光谱辐射计测量得到的特征参照体反射率. $\rho_{ij}^s(\lambda)$ 为标准参照体反射率. $f_{ij}(\lambda)$ 为成像光谱仪的归一化光谱响应函数.

利用光谱特征靶标反演成像光谱仪中心波长偏移量 $\Delta\lambda$ 和带宽偏移量 $\Delta FWHM$ 的二维代价函数, 定义为

$$\Delta^2(\Delta\lambda, \Delta FWHM) = \sum_{i=n_1}^{n_2} [\rho_{ij}^{rc}(\Delta\lambda, \Delta FWHM) - \rho_{ij}^t]^2, \quad (3)$$

式中, n_1 和 n_2 分别为所选特征吸收谱段区间的边界.

场地绝对辐射定标流程如下.

(1) 飞机过顶时, 测量太阳天顶角 θ_0 和传感器天顶角 θ_v , 并求出 $u_0 = \cos\theta_0$ 和 $u_v = \cos\theta_v$.

(2) 测量大气环境参量, 计算出整层大气光学厚度 τ_0 和目标至传感器的大气光学厚度 τ_v , 由此计算出太阳至目标的大气透射率 $T_{\theta_0} = e^{-\tau_0/\cos\theta_0}$ 和目标至传感器的大气透射率 $T_{\theta_v} = e^{-\tau_v/\cos\theta_v}$.

(3) 飞行中, 测量辐射靶标和自然靶标的反射率, 假定测得地面靶标(大面积且表面均匀)反射率为 ρ .

(4) 计算无人机搭载载荷入瞳处表观反射率 ρ^* 为

$$\rho^* = \rho_a(\lambda) + \frac{\rho}{1 - S(\lambda) \cdot \rho} T_{\theta_0}(\lambda) T_{\theta_v}(\lambda), \quad (4)$$

式中, S 是大气球面反照率, $\rho_a(\lambda)$ 是大气反射率; $T_{\theta_0} = e^{-\tau_0/\cos\theta_0}$ 是大气下行透射率, $T_{\theta_v}(\lambda)$ 是传感器和目标之间的透过率(包括直射透过率 $e^{-\tau_v/\cos\theta_v}$ 和散射透过率 $t'_c(\theta_v)$, $T_{\theta_v}(\lambda) = e^{-\tau_v/\cos\theta_v} + t'_c(\theta_v)$).

(5) 由式(4)计算传感器入瞳处辐亮度:

$$L(\theta_0, \phi_0; \theta_v, \phi_v) = \frac{u_0 E_0 \rho^*}{\pi \cdot d^2}, \quad (5)$$

式中, d 为日地天文单位距离, 取值为1; E_0 为大气顶部的太阳辐照度.

(6) 由式(5)计算定标参数:

$$L = \text{gain} \cdot DN + \text{bias}, \quad (6)$$

式中, L 为地物在传感器入瞳处的辐亮度; DN 为载荷获取的数字图像上相应区域的像元灰度值; gain 和 bias 分

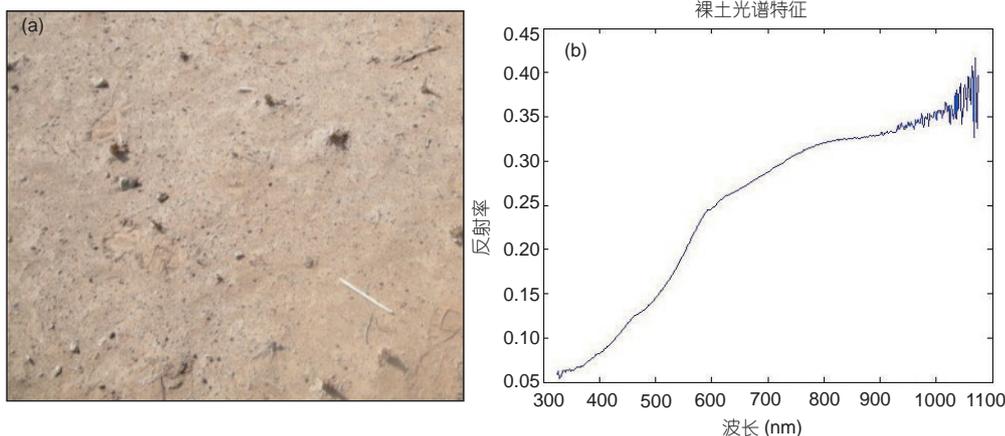


图3 (网络版彩图)裸土-自然靶标(a)及实测光谱(b).
Figure 3 (Color online) Bare soil-natural target (a) and measured spectrum (b).

别为图像的增益和偏置。

(7) 由此实现地物校正模型(图4, 式(7)):

$$DN = kL + g, \tag{7}$$

式中, k, g 为地表成像校正参数。

2.3 无人机观测载荷外场定标结果分析

利用人工特征光谱靶标对中国科学院长春光学精密机械与物理研究所某型号成像光谱仪进行飞行中光谱定标。

光谱靶标在氧气吸收波段的反射率反演误差如图5所示。外场定标前的实验室光谱定标结果反演的反

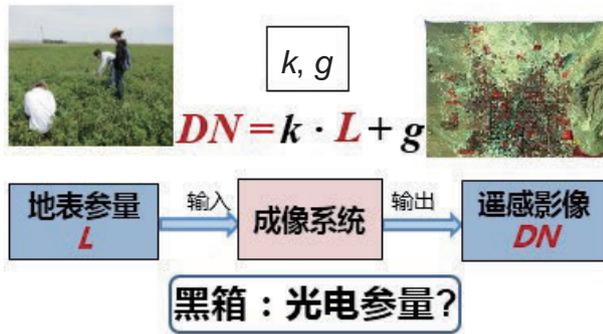


图4 (网络版彩图)影像DN和地物L的校正关系
Figure 4 (Color online) The relationship between image DN and physical feature L.

射率在氧气吸收波段附近的最大误差为 ± 15 nm, 而基于外场光谱定标参数反演的反射率在氧气吸收波段的最大误差为 ± 2 nm. 因此在高光谱仪器5 nm分辨率条件下, 如果只考虑光谱参数变化对反射率反演的影响, 经过检验后得出定标精度为0.5 nm, 则实际的光谱定标精度优于0.5 nm.

本文无人机观测载荷的外场绝对辐射定标采用反射率基法, 其原理为: 选择大气环境较为干洁的天气, 在传感器过境的同时进行地面靶标的反射率测量, 计算大气气溶胶光学厚度, 同时获取大气中水汽和臭氧含量. 将测量的地面靶标反射率、气溶胶光学厚度、水汽含量及臭氧含量输入到辐射传输模型中即可以获得在不同反射率情况下传感器接收到的辐亮度(入瞳辐亮度, 亦称表观辐亮度), 如图6所示. 将传感器对地面靶标的响应与计算得到的入瞳辐亮度进行最小二乘法计算, 即可得到传感器定标的增益与偏置, 从而完成传感器的绝对辐射定标.

辐射定标的结果误差可以用不确定度描述. 由于大气参数项、地面测量项、仪器项与模型项各自之间并没有明确的关联, 可以认为这4项之间是相互独立的, 辐射定标结果总不确定度为各项不确定度平方和的平方根(式(8)). 不确定度越小, 定标结果越可靠, 影像越接近地物真值^[20], 遥感信息质量越高. 本文选取

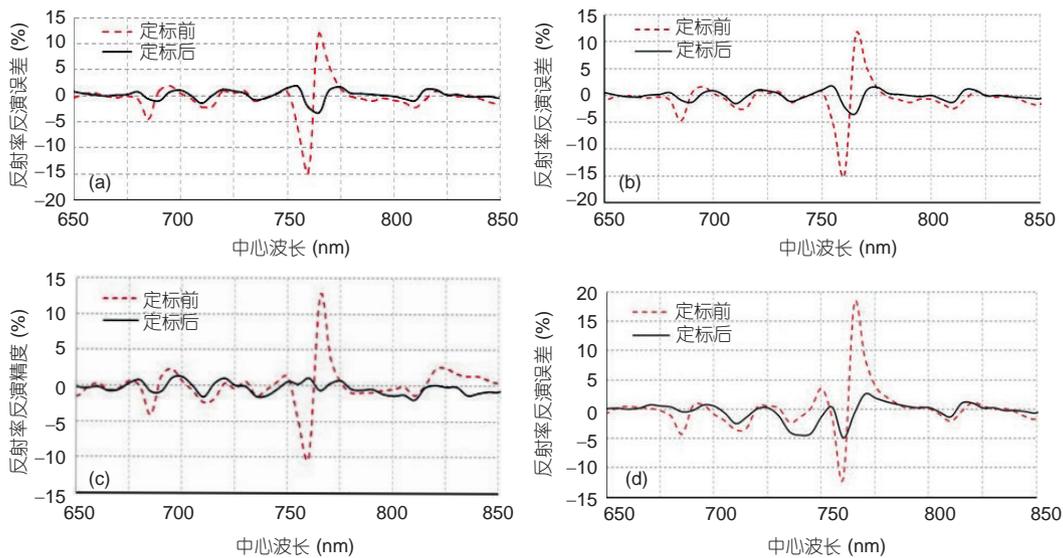


图5 (网络版彩图)光谱靶标氧气吸收波段反射率反演误差. (a) 红色靶标(H01); (b) 黄色靶标(H02); (c) 绿色靶标(H03); (d) 蓝色靶标(H04)
Figure 5 (Color online) Spectral target oxygen absorption band reflectance inversion error. (a) Red target (H01); (b) yellow target (H02); (c) green target (H03); (d) blue target (H04).

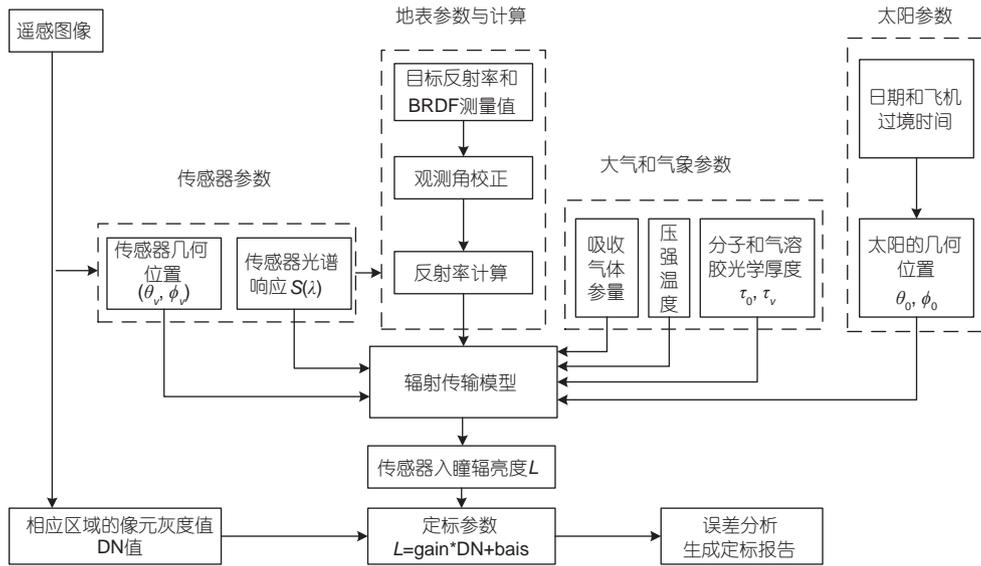


图6 反射率基法
Figure 6 Reflectivity based method.

了2个特征吸收波段用作辐射定标, 对各个影响因素的不确定度进行分析, 包括气溶胶类型误差、水汽误差、臭氧误差、中心波长误差、地表反射率误差、地表朗伯性和模型误差。辐射定标结果总不确定度为以上7项不确定度各项平方和的平方根。表1为计算得到2个示例波段的总不确定度。从表中可以看出, 总不确定度小于6%。

$$\bar{\delta} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2 + \delta_5^2 + \delta_6^2 + \delta_7^2} \quad (8)$$

3 建立光电参量分解模型并与地学校正误差模型的联解

3.1 传感器光电参量分解

由于地物校正模型(图4)将成像系统视为黑箱, 所

以模型参数与成像系统本身的物理参数没有明确的对应关系, 无法表达成像系统各部件的参数对成像过程的影响, 不能为遥感信息品质的提升提供物理基础。因此, 为了从根本上提升遥感信息品质, 必须深入理解光学成像系统的物理过程以及其对输出图像DN值的影响。一套光学遥感成像系统主要包括两大部件: 光学成像部件和电子学处理部件^[21], 其成像本质是一个能量传输与转化的过程(图7)。光学成像部件的主要作用是收集地物反射的太阳光辐射, 实现物像变换和像差补偿, 将地物所成的像汇聚到承影面上并完成光电转换。电子学部件主要完成对电信号的放大, 模拟-数字转换模块完成对电信号的采样、量化和编码输出。

光学传感器成像过程中的能量传输与转化过程如下。

- (1) 根据针孔成像原理, 在垂直摄影的情况下, 每

表1 误差分析
Table 1 Error analysis

误差项	气溶胶消光系数误差 (%)	气溶胶类型误差 (%)	水汽误差 (%)	臭氧误差 (%)	中心波长误差 (%)	地表反射率误差 (%)	地表朗伯性 (%)	模型误差 (%)	总不确定度 (%)
波段1 (中心波长: 548.1 nm)	1.97	1.51	1.34	1.51	0.15	3	1	1	4.61
波段2 (中心波长: 762.75 nm)	1.61	1.30	1.25	1.02	2.85	3	1	1	5.09

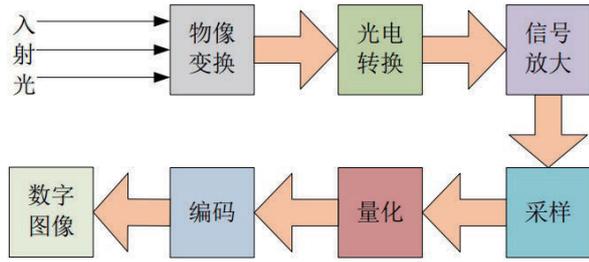


图 7 (网络版彩图)光学遥感成像系统内部的能量传输与转化物理过程

Figure 7 (Color online) The physical process of energy transmission and conversion inside the optical remote sensing imaging system.

个像素对应的地表成像区域的边长:

$$D = \frac{H}{f}a. \quad (9)$$

星下点像素对应的成像区域的面积:

$$S_{\text{Ground}} = D^2 = \left(\frac{H}{f}a\right)^2. \quad (10)$$

成像系统的入瞳孔径相对于地面成像区域所张立体角:

$$\Omega = \frac{\pi \cdot r^2}{H^2}, \quad (11)$$

式中, H 为行高, f 为等效焦距, a 为每个像素的尺寸, r 为成像系统的入瞳孔径半径.

(2) 入瞳辐亮度的定义, 如式(12)所示:

$$L = \frac{\phi / \Omega}{S \cdot \cos\theta}. \quad (12)$$

根据式(12), 可直接计算出光学遥感成像系统入瞳处的辐射通量:

$$\phi = L\Omega S \cos\theta, \quad (13)$$

式中, θ 为天顶角, S 为辐射源的面积.

(3) 在电子学部件的光电转换中, 经过时间 T 后 CCD每个像素势阱存储的电子数为

$$N_e = \int_0^T N_L \tau \eta dt + n_c, \quad (14)$$

式中, N_L 为单位时间内入射到成像系统光学孔径的光子数, τ 为光学系统的透过率, η 为光电效应的量子效率, 即为一个光子平均所能激发的电子数, n_c 为光电转换过程中系统噪声等效电子数. N_L 的定义如式(15)所示:

$$N_L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} n_l(\lambda) d\lambda. \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)可得

$$N_e = \int_0^T \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} n_l(\lambda) \tau(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda dt + n_c. \quad (16)$$

(4) 在光电流的放大与转换中, 每个像素最终输出的电压信号 V_G 为

$$\begin{aligned} V_G &= \zeta N_e + n_g \\ &= G\zeta \left(\int_0^T \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} n_l(\lambda) \tau(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda dt + n_c \right) + n_g, \end{aligned} \quad (17)$$

式中, G 为该过程中信号处理电路对电压信号的放大倍数, 即电子积分, ζ 为电流信号转化为电压信号的转换系数, $G\zeta$ 为光电放大倍数, n_g 为在这两个过程中引入新噪声的等效电压. 对于实际的成像系统, 上述过程可能会包含多级放大和其他处理过程, 但是这里为了简化表达, 使用电流与电压信号的转换系数 ζ 和电子学增益(电子积分) G 来表达这一过程.

(5) 在电信号的采样、量化与编码中, 成像系统输出的量化值 DN 可以表示为

$$DN = \text{int} \left[\frac{V_G}{V_{\text{REF}} / (2^n - 1)} \right] = \text{int} \left[(2^n - 1) \frac{V_G}{V_{\text{REF}}} \right], \quad (18)$$

式中, V_{REF} 为量化参考电压, int 代表取整运算. 将式(17)代入式(18)得

$$\begin{aligned} DN &= \text{int} \left[\frac{2^n - 1}{V_{\text{REF}}} \times \right. \\ &\quad \left. \left(G\zeta \int_0^T \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} n_l(\lambda) \tau(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda dt + G\zeta n_c + n_g \right) \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

根据爱因斯坦的量子理论, 每个光子的能量为 $\varepsilon = h\nu$, 则光学遥感成像系统入瞳处的辐射能通量可以表示为

$$\varphi = \sum_i n_i h\nu_i = \sum_i n_i h \frac{c}{\lambda_i}. \quad (20)$$

式(20)是光学遥感成像系统入瞳处的辐射通量, 也就是入射光子流能量总和. 由于太阳光辐射近似为一个连续光谱, 因此式(20)可以写成积分的形式:

$$\varphi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} n_l(\lambda) h \frac{c}{\lambda} d\lambda = hc \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{n_l(\lambda)}{\lambda} d\lambda, \quad (21)$$

式中, $n_l(\lambda)$ 为单位时间内入射到光学成像系统入瞳处

光子数的谱分布.

(6) 入瞳辐亮度表示为

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) d\lambda = \frac{\varphi/\Omega}{S \cos \theta} = \frac{hc \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{n(\lambda)}{\lambda} d\lambda / \frac{\pi \cdot r^2}{H^2}}{\left(\frac{H}{f}\right)^2 \cos \theta}$$

$$= \frac{hc \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{n(\lambda)}{\lambda} d\lambda}{\pi \cdot r^2 (a/f)^2 \cos \theta} \quad (22)$$

(7) 为了得到入瞳光谱辐亮度与像素值DN之间的定量关系, 将式(22)改写为

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{n(\lambda)}{\lambda} d\lambda = \frac{\pi \cdot r^2 (a/f)^2 \cos \theta}{hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) d\lambda. \quad (23)$$

将式(23)的两边微分可得

$$n(\lambda) = \frac{\pi \cdot r^2 (a/f)^2 \cos \theta}{hc} \lambda L(\lambda). \quad (24)$$

(8) 将式(24)代入式(19)得到光学遥感成像系统辐射定标地学-光电参量转换分解模型, 如图8所示. 与黑箱模型不同, 参量分解模型中的DN值不仅与入瞳辐亮度L和波长有关外, 还与成像系统的电子积分、量子效率、光学镜头透过率、光电放大倍数和量化参考电压有关.

3.2 地学误差校正

设置综合变量 A_1, B_1, C , 将3.1节得到的参量分解模型变形为

$$DN = \text{int} \left[A_1 G \int_0^T \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda) \eta(\lambda) \lambda L(\lambda) d\lambda dt + B_1 G + C \right], \quad (25)$$

式中,

$$A_1 = \frac{(2^n - 1) \zeta \pi r^2 (a/f)^2 \cos \theta}{V_{REF} hc}, \quad (26)$$

$$B_1 = \frac{2^n - 1}{V_{REF}} \zeta n_c, \quad (27)$$

$$C = \frac{2^n - 1}{V_{REF}} n_g. \quad (28)$$

令 $S_1(\lambda) = \tau(\lambda) \eta(\lambda) \lambda$, 则式(25)可以表示为

$$DN = \text{int} \left[A_1 G \int_0^T \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_1(\lambda) L(\lambda) d\lambda dt + B_1 G + C \right]. \quad (29)$$

$S_1(\lambda)$ 表征的是成像系统的光电特性, 称为成像系统的光谱响应函数. 成像系统光谱响应函数曲线(图9)可以实验室标定获得. 同时考虑在成像积分时间 T 内入瞳辐亮度不随时间变化, 则式(29)可以改写为

$$DN = \text{int} [A_2 GTL + B_1 G + C], \quad (30)$$

式中, $A_2 = A_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_1(\lambda) d\lambda$, $L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) d\lambda$.

式(30)的取整运算不是初等函数, 仍然不便于使用. 由于取整运算内部是一个多元函数表达, 因此, 可以采用多项式拟合来表达成像系统输出图像像素值DN与成像系统积分时间 T 、电子学增益 G 、入瞳辐亮度 L 之间的数学关系:

$$DN = aTGL + b. \quad (31)$$

在定量遥感应用中, 首先要根据影像的DN值计算入瞳辐亮度进而求解地物的光谱反射率等参量, 因此对式(31)变形得

$$L = \frac{1}{aTG} DN - \frac{b}{aTG}, \quad (32)$$

式中, a 和 b 分别为模型拟合系数, 对应 A_2 和 $B_1 G + C$, L 为入瞳辐亮度.

在黑箱地物校正模型中:

$$L = \frac{1}{k} DN - \frac{g}{k}. \quad (33)$$

对比式(32)和(33)可知, 地物校正模型的拟合参数 k 和 g 与光学成像系统的电光参数密切相关, 分别对应

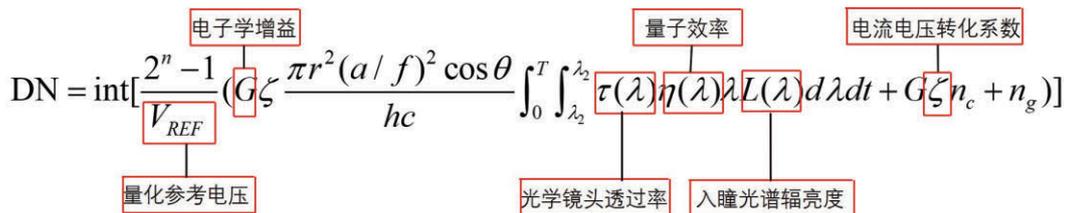


图8 (网络版彩图)光学遥感成像系统辐射定标地学-光电参量转换分解模型

Figure 8 (Color online) Geoscience-photoelectric parameter conversion decomposition model for radiation calibration of optical remote sensing imaging system.

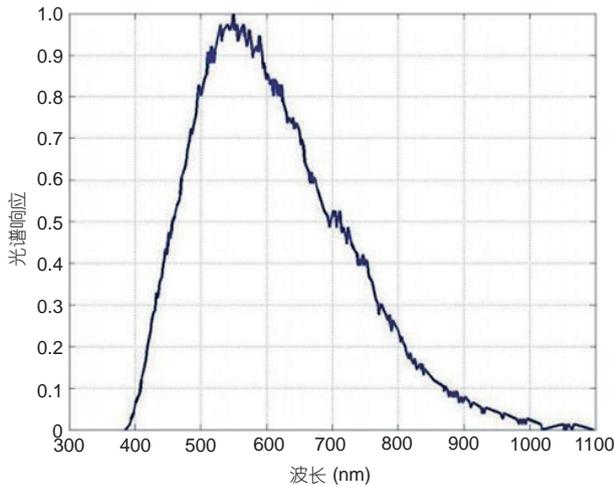


图 9 (网络版彩图) 全色相机的光谱响应函数
 Figure 9 (Color online) Spectral response function of panchromatic camera.

真实拟合系数 aTG 和 b 。可以通过调整光电参数(T, G)

连续改变 k 和 g 值, 当 k 接近1, g 接近0时达到最佳观测效果, 此时, 影像 DN 值逼近地物真值 L 。据此, 可以在实验室辐射标定过程中获得多类载荷多元参量连续调整时影像变化图序(图10)。从图10可以看出, 随着电子学增益的增加, 图像的整体亮度逐渐增加, 同时图像灰度分布直方图的形态也逐渐趋缓, 说明图像不同灰度等级上像素的分布逐渐展开, 图像的细节信息增强, 遥感信息质量得到提升。

4 仪器品质改进

4.1 基于地学参量外场定标校正方程的仪器品质退化

在研制高光谱成像光谱仪时, 除了要考虑大气影响, 还要考虑传感器辐射及光谱定标参数(中心波长与带宽)的变化也会扭曲传感器接收的信号^[22,23], 降低遥

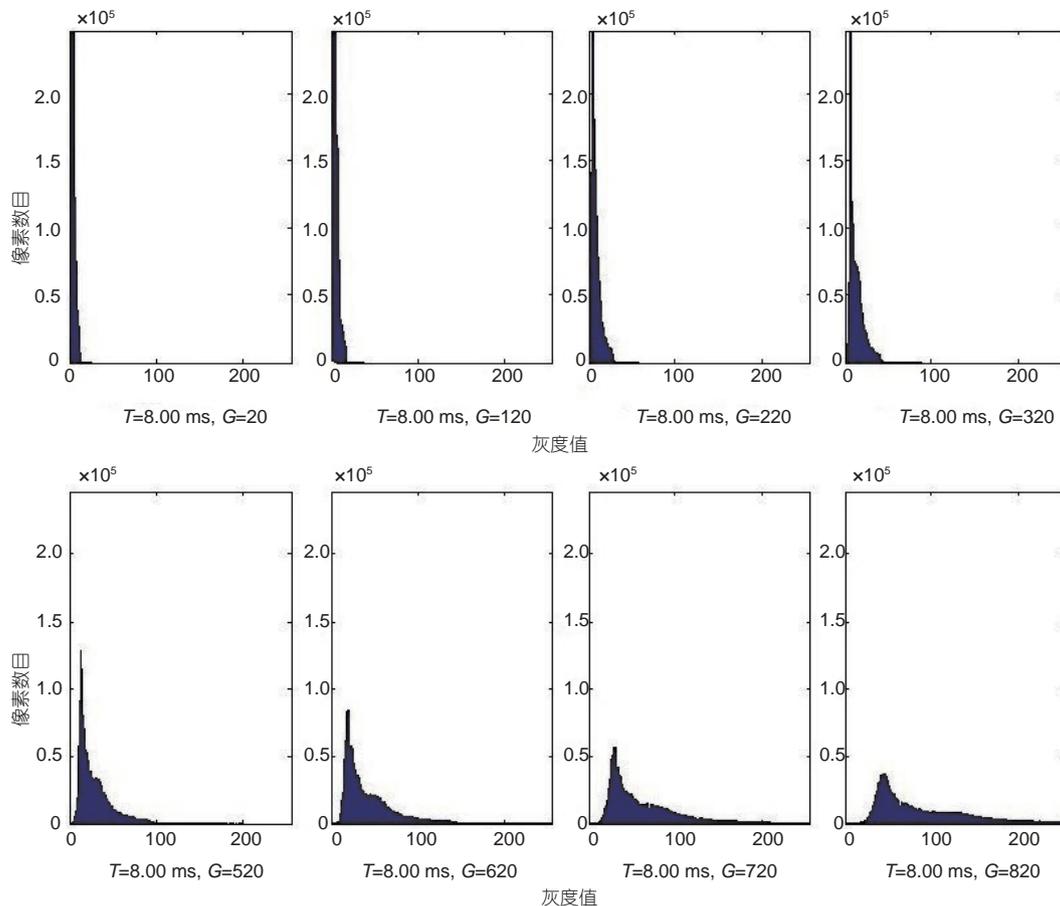


图 10 (网络版彩图) 图像灰度分布直方图随电子学增益改变的变化
 Figure 10 (Color online) Variation of the grayscale distribution histogram of the image with the change of electronic gain.

感信息品质. 中心波长的改变会导致传感器入瞳光谱辐亮度测量的误差, 进而影响到后续的反射率反演. 同时带宽变化也会影响传感器对光谱吸收特征的刻画^[24].

根据成像光谱仪参数验证场(光谱定标场不同空间位置光谱辐亮度曲线见图11)模拟计算结果显示, 当成像光谱仪的光谱定标不准确时, 5~7 nm带宽的传感器反演的反射率在气体吸收附近会产生尖的凸起和凹陷, 如图12(a)所示; 0.5 nm的中心波长偏移在氧气760 nm吸收带能带来近5%的辐亮度测量误差, 如图12(b)所示. 图13显示中心波长漂移和带宽变化在大气吸收带附近产生显著辐亮度误差, 进而影响反射率反演结果, 从而说明仪器760 nm波长处误差来自中心波长偏移和宽带退化. 表2为5 nm的设计带宽随时间

的退化情况. 据此以地物误差最小来调整传感器光电参数及中心波长和带宽, 使光谱仪输出的辐射图像的灰度值逼近地物真值, 即 k 逼近1, g 逼近0; 当系统运营以后, 研究人员可通过星上或地面的定标实验计算参量分解模型中的真实拟合系数, 当校正系数偏离 $k=1$, $g=0$ 时, 说明成像系统性能发生了退化; 进一步根据参量分解模型分析可能发生退化的系统部件, 实现成像光谱仪光学系统性能退化的监测、指标和结构的改进, 及光电参量设计改型.

4.2 仪器光电参量分解模型下的载荷研制

系统参量分解模型成功地将地表成像参数和传感器的光学参数和电子学参数联系起来, 从而明确了传

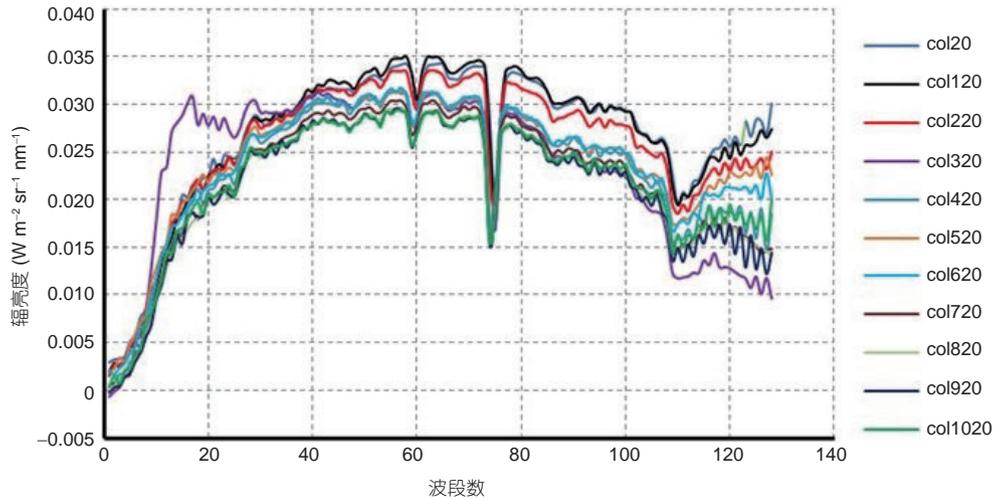


图 11 (网络版彩图)光谱定标场不同空间位置光谱辐亮度曲线

Figure 11 (Color online) Spectral radiance curves of different spatial positions of the spectral calibration field.

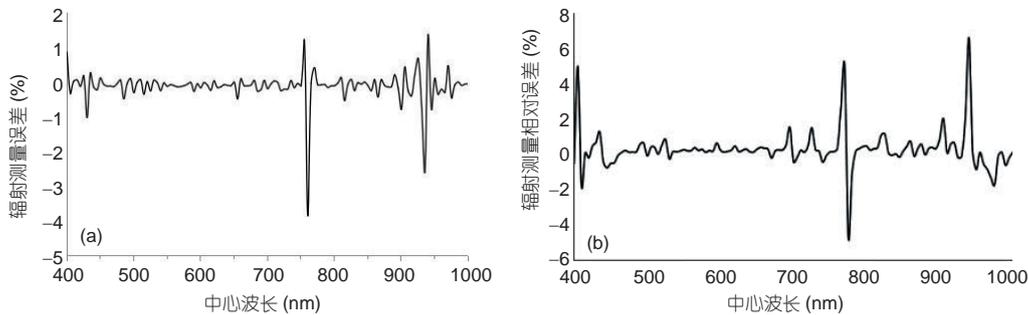


图 12 带宽为6 nm时, 中心波长偏移0.5 nm (a)和带宽偏移0.5 nm (b)对辐射测量值的影响

Figure 12 The effect of center wavelength shift of 0.5 nm (a) and bandwidth shift of 0.5 nm (b) on the radiation measurement value when the bandwidth is 6 nm.

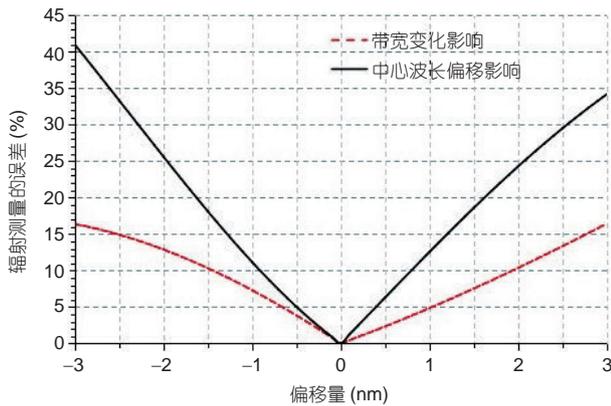


图 13 (网络版彩图)氧气吸收波段中心波长偏移量和带宽变化量与辐射测量值误差的关系

Figure 13 (Color online) The relationship between the center wavelength offset and the bandwidth change of the oxygen absorption band and the error of the radiation measurement value.

表 2 带宽退化随时间变化

Table 2 Bandwidth degradation changes with time

时间	带宽退化为 (nm)
第一年	5.32
第二年	5.74
第三年	6.04
第四年	6.28

传感器参量对光学系统成像质量的影响。根据式(24)可知, 调整光电参数(T, G)连续改变拟合系数 k 和 g 值, 若想影像 DN 值逼近地物真值 L , 则 k 值应逼近1, g 逼近0, 即以仪器光电物理参数调整提升遥感信息品质。

该原理方法对于遥感仪器的研制具有重要的意义。比如薛庆生和王淑荣^[25]发明了大相对孔径宽视场小型化成像光谱仪光学系统并对其进行光谱和辐射定标, 如图14所示; 以及基于该原理发明的地基对月观测的宽波段高光谱分辨率成像系统^[26], 如图15所示。通常, 透射系统的透射率会随探测波段的不同而变化。此外, 在宽波段范围内, 探测器的量子效率变化也是剧烈的。根据式(32)可知, 透射率和量子效率的非线性变化对地学误差(影像 DN 值与地物真值 L 的逼近程度)均存在较大影响。为了减弱这部分影响, 对月观测系统采用反射式结构, 系统的透过率不会随波段变化。同时, 采用双通道分波段探测的方式, 使用分色片将宽波段的光束分成两个窄波段, 使用两个在窄波段范围内量子效率稳定的探测器分别对每个窄波段的光谱进行探测, 避免了探测器的量子效率在宽波段范围内的大幅度变化。由此, 调整光电参数(T, G)使 k 接近1, g 接近0, 即可从成像系统源端校正地物观测误差, 实现影像向地物真值的逼近, 提升遥感信息质量, 进一步可引导仪器改进和研制。

综上, 当仪器性能退化时, 由外场定标得到的地物校正模型的拟合系数 k 会偏离1, g 会偏离0, 影像 DN 值会偏离地物真值 L , 此时可根据地物-光电参量分解模型分析可能退化的仪器部件, 实时地自适应调整系统参量集, 使影像 DN 值逼近地物真值 L , 提升遥感信息品质, 即以遥感信息品质验证仪器品质并改进。目前, 该原理方法已被成功推广应用于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、西安光学精密机械研究所和上海技术物理研究所遥感载荷的研制和标定研究。

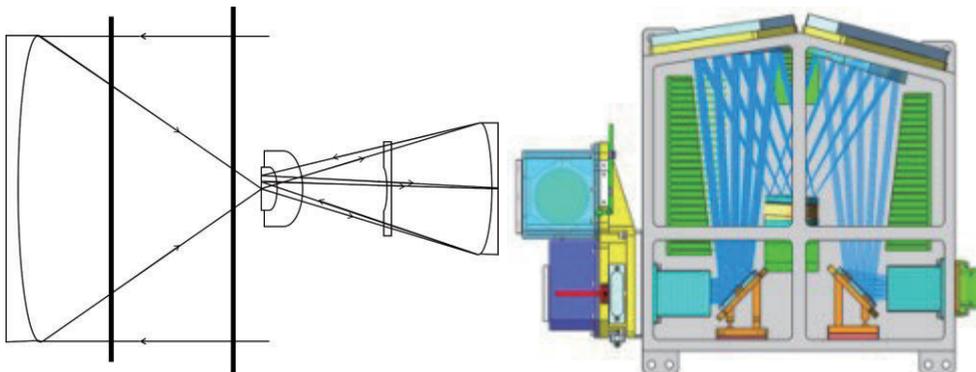


图 14 (网络版彩图)大相对孔径宽视场小型化成像光谱仪光学系统

Figure 14 (Color online) Large relative aperture and wide field of view miniaturized imaging spectrometer optical system.

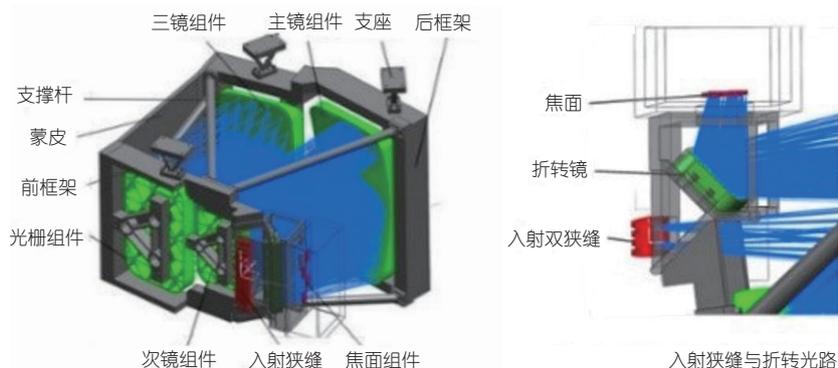


图 15 (网络版彩图)地基对月观测的宽波段高光谱分辨率成像系统

Figure 15 (Color online) Wide-band high-spectral resolution imaging system for ground-based moon observation.

5 结论

本文对遥感信息质量提升方法的一些重要物理基础进行了探索研究, 贡献主要包括以下三点。

(1) 建立了我国辐射-光谱-空间-时间4个分辨率监测能力的无人机遥感载荷综合验证场, 设计并布设了4类靶靶。采用这4类靶靶构建了完整的无人机观测载荷外场定标校正体系, 并给出了地物真值 L 与外场实际飞行 DN 影像值之间的定标精度校正方程, 将外场定标前 ± 15 nm的光谱误差减小为 ± 2 nm。

(2) 建立影像 DN 值与传感器光电参量分解方程, 该模型能够提供成像系统退化的部件信息和退化时间, 从而对仪器的改进和研制提供了思路。实验表明, 连续调整光电参量可以改变图像的细节信息。

(3) 将前两点中的方程联立, 建立了地物定标校正

参量与成像传感器参量之间的关系, 对地表参量与成像系统光电参量进行有效关联。实现了高光谱仪器5 nm分辨率条件下0.5 nm的定标精度。提出了基于地物定标精度引导的仪器性能退化监测和仪器性能改进方法。即让地物校正模型的拟合系数 k 逼近1, g 逼近0时, 光谱仪器输出的辐射图像的灰度值将逼近地物真值, 从而在成像系统端最大限度地减小地学误差。该原理已被成功推广应用于国内多家遥感载荷研制单位的仪器研制和标定。

本文实验主要在航空遥感上完成, 但理论和方法可以向卫星遥感推广。本研究为遥感光学成像系统的改进和性能跟踪提供方法指导, 为高分辨率遥感地学误差的自动校正、遥感信息智能化处理等更深入的研究提供有力支持。

致谢 感谢中国科学院上海技术物理研究所王跃明、舒嵘研究员, 中国科学院西安光学精密机械研究所王乐、胡炳樑研究员提供的帮助。

参考文献

- 1 Liu Q Q, Zheng Y Q. Development of spectral calibration technologies with ultra-high resolutions (in Chinese). *Chin Opt*, 2012, 5: 566–577 [刘倩倩, 郑玉权. 超高分辨率光谱定标技术发展概况. *中国光学*, 2012, 5: 566–577]
- 2 Lin J, Shao J, Song C Y, et al. High-precision spectral calibration method for interferometric spectrometer (in Chinese). *Spectrosc Spectral Anal*, 2015, 35: 3534–3537 [林军, 邵俊, 宋超宇, 等. 干涉型光谱仪高精度光谱定标方法. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35: 3534–3537]
- 3 Gu X F, Tian G L, Li X W, et al. Quantification of remote sensing information (in Chinese). *Chin Sci Ser E: Inform Sci*, 2005, 35(suppl): 1–10 [顾行发, 田国良, 李小文, 等. 遥感信息的量化. *中国科学E辑: 信息科学*, 2005, 35(增刊1): 1–10]
- 4 Xiao Q. Quantitative research on airborne remote sensing data (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: University of Chinese

- Academy of Sciences, 2002 [肖青. 机载遥感数据的定量化研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2002]
- 5 Wang H B, Huang X X, Fang C Y, et al. Research on on-orbit spectral calibration method of grating dispersive imaging spectrometer (in Chinese). *Spectrosc Spectral Anal*, 2018, 38: 296–301 [王宏博, 黄小仙, 房陈岩, 等. 光栅色散型成像光谱仪的在轨光谱定标方法研究. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38: 296–301]
 - 6 Li Z X, Wu Q W, Yan C X, et al. Analysis of the slit thermal spectral characteristics of hyperspectral imager (in Chinese). *Opt Tech*, 2008, 34: 437–440 [李泽学, 吴清文, 颜昌翔, 等. 超光谱成像仪狭缝热光谱特性的分析. *光学技术*, 2008, 34: 437–440]
 - 7 Mouroulis P, Green R O, Chrien T G. Design of pushbroom imaging spectrometers for optimum recovery of spectroscopic and spatial information. *Appl Opt*, 2000, 39: 2210–2220
 - 8 Gao B C, Montes M J, Davis C O. A curve fitting technique to improve wavelength calibrations of imaging spectrometer data. In: *Proceedings of the 11th JPL Airborne Science Workshop*. Pasadena, 2002. 99–105
 - 9 Santantonio N, Bartoloni A, Bini A, et al. A multi-parameter retrieval approach to HypSEO spectral and radiometric calibration. In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Toronto, 2002. 2735–2737
 - 10 Ponzoni F J, Zullo J, Lamparelli R A C, et al. In-flight absolute calibration of the landsat-5 TM on the test site Salar de Uyuni. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2004, 42: 2761–2766
 - 11 Gu X F, Guyot G, Verbrugge M. Evaluation of measurement errors in ground surface reflectance for satellite calibration. *Int J Remote Sens*, 1992, 13: 2531–2546
 - 12 Gou Z Y, Yan L, Chen W, et al. On-site spectral calibration of hyperspectral imager with target spectral features. In: *Proceedings of ICECC-International Conference on Electronics, Communications and Control*. Ningbo, 2011. 933–936
 - 13 Duan Y N, Chen W, Wang M Z, et al. A relative radiometric correction method for airborne image using outdoor calibration and image statistics. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2014, 52: 5164–5174
 - 14 Duan Y N, Yan L, Yang B, et al. Outdoor relative radiometric calibration method using gray scale targets. *Sci China Tech Sci*, 2013, 56: 1825–1834
 - 15 Chen W, Yan L, Li Z, et al. In-flight absolute calibration of an airborne wide-view multispectral imager using a reflectance-based method and its validation. *Int J Remote Sens*, 2013, 34: 1995–2005
 - 16 Liu L, Gao H L, Pan Z Q, et al. Research on on-orbit radiation calibration method based on deep learning (in Chinese). *Spacecr Recov Remote Sens*, 2017, 38: 64–71 [刘李, 高海亮, 潘志强, 等. 基于深度学习的在轨辐射定标方法研究. *航天返回与遥感*, 2017, 38: 64–71]
 - 17 Fei Y T. *Error Theory and Data Processing* (in Chinese). 6th ed. Beijing: Machinery Industry Press, 2005 [费业泰. *误差理论与数据处理*. 第6版. 北京: 机械工业出版社, 2005]
 - 18 Wang M Z. System parameter decomposition and imaging control of optical remote sensing radiation calibration model (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Peking University, 2014 [王明志. *光学遥感辐射定标模型的系统参量分解与成像控制*. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 2014]
 - 19 Gou Z Y, Yan L, Chen W, et al. Research on the spectral calibration method of imaging spectrometer based on spectral absorption target (in Chinese). *Spectrosc Spectral Anal*, 2013, 33: 571–574 [勾志阳, 晏磊, 陈伟, 等. 基于光谱吸收靶标的成像光谱仪光谱定标方法研究. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33: 571–574]
 - 20 Chen W, Zhao H, Li Z, et al. Uncertainty evaluation of an in-flight absolute radiometric calibration using a statistical Monte Carlo method. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2015, 53: 2925–2934
 - 21 Wang L X. Space optical remote sensing instrument (in Chinese). *Spacecr Recov Remote Sens*, 1998, 2: 38–44 [王丽霞. *航天光学遥感仪器*. *航天返回与遥感*, 1998, 2: 38–44]
 - 22 Wang T, Yan G, Ren H, et al. Improved methods for spectral calibration of on-orbit imaging spectrometers. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2010, 48: 3924–3931
 - 23 Green R O. Spectral calibration requirement for earth-looking imaging spectrometers in the solar-reflected spectrum. *Appl Opt*, 1998, 37: 683–690
 - 24 Li B, Yan L, Zhang L F. The influence of sensor spectral index on vegetation spectral simulation accuracy (in Chinese). *Spectrosc Spectral Anal*, 2010, 30: 1843–1847 [李博, 晏磊, 张立福. 传感器光谱指标对植被光谱模拟精度的影响. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30: 1843–1847]
 - 25 Xue Q S, Wang S R. Optical system of miniaturized imaging spectrometer with large relative aperture and wide field of view (in Chinese). *China Patent*, CN103308160B, 2015-04-22 [薛庆生, 王淑荣. 大相对孔径宽视场小型化成像光谱仪光学系统. 中国专利, CN103308160B, 2015-04-

22]

- 26 Xue Q S, Wang S R. A wide-band hyperspectral resolution imaging system for ground-based moon observations (in Chinese). China Patent, CN105181137B, 2017-09-12 [薛庆生, 王淑荣. 用于地基对月观测的宽波段高光谱分辨率成像系统. 中国专利, CN105181137B, 2017-09-12]

The source-end method of remote sensing information quality enhancement and the physical basis of geoscience-photoelectric parameters connection

YAN Lei^{1,4}, JIANG KaiWen¹, FAN BangKui², ZHENG YuQuan³, WANG MingZhi⁵,
GOU ZhiYang^{1,6}, HU XiuQing⁷, ZUO ZhengKang¹, FU Yu¹ & ZHAO HongYing¹

¹ Spatial Information Integration and 3S Engineering Application Beijing Key Laboratory, Institute of Remote Sensing and Geographic Information System, Peking University, Beijing 100871, China;

² Beijing Institute of Information Technology, Beijing 100094, China;

³ Changchun Institute of Optical Precision Machinery and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

⁴ Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Remote Sensing, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin 541004, China;

⁵ Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

⁶ Beijing Pudaditai Technology Co. Ltd., Beijing 100089, China;

⁷ National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

The improvement of spatial information quality is the basis and goal of the quantitative development of high-resolution remote sensing. This paper presents a new method for improving the quality of the remote sensing information obtained from the source of an imaging system; this method also realizes the mutual conversion of the geoscience and optical parameters. By continuously adjusting the photoelectric parameters of the imaging sensor, it was possible to minimize the observation error of the terrestrial object observation image. By adjusting the photoelectric physical parameters of the instrument, the quality of the remote sensing information was improved. The image digital number (DN) value obtained by field calibration experiments was used to adjust the photoelectric parameters by using the correction model $DN=kL+g$ of the ground object L . When the real fitting coefficient k approached 1, and the deviation g approached 0, the image DN value approached the real value L of the ground object. Furthermore, when k deviated from 1 and g from 0, the observation error increased, and the instrument degenerated. The deteriorated components of the instrument could be obtained using the photoelectric parametric decomposition equation, which can be used to verify the quality of the instrument and to improve the quality of spatial information. The new mechanism for measuring the load quality of the remote sensing imaging based on the geo-optoelectronic parameter conversion and penetration can overcome the technical bottleneck of non-correlation between the surface parameters and photoelectric parameters of the imaging system. This mechanism solves the difficulty involved in measuring the remote sensing imaging error equivalently from the source of the photoelectric imaging system. The theory and experiment proved that the mechanism was effective and feasible.

remote sensing information quality, geoscience-photoelectric parametric conversion, sensors, outfield calibration, observation error, instrument degradation

doi: 10.1360/SST-2020-0031