

文章编号 1004-924X(2017)09-2259-08

传递辐射计光谱通道的优化设计

孙立微^{1,2}, 叶 新¹, 王玉鹏¹, 方 伟^{1*}

(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 100049)

摘要: 鉴于传递辐射计对成像光谱仪定标时其通道选择对成像光谱仪的定标精度具有重要影响, 本文使用 MATLAB 语言编写评价函数, 作为对 3 000 K 黑体光谱曲线进行多光谱反演精度的评价标准, 最后利用 MATLAB 遗传算法和模式搜索算法工具箱对评价函数寻找最小值解, 即传递辐射计的最优通道选择, 并根据评价函数对光谱通道数、中心波长偏移、带宽展宽和测量系统误差对光谱反演精度的影响进行分析。结果表明, 为实现 0.12% 的光谱反演精度, 要求传递辐射计中心波长的偏移量不超过 0.2 nm、带宽展宽不大于 0.02 nm, 测量系统误差小于 0.1%。本研究可以指导传递辐射计的设计, 对提高地球成像光谱仪的定标精度具有重要意义。

关键词: 成像光谱仪; 传递辐射计; 优化选择通道; 反演精度; 遗传算法

中图分类号: TP732 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172509.2259

Optimization of spectral channel of transfer radiometer

SUN Li-wei^{1,2}, YE Xin¹, WANG Yu-peng¹, FANG Wei^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
University of Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: Fangw@ciomp.ac.cn

Abstract: As channel selection acts an important influence on calibration accuracies in the calibration of imaging spectrometers by transfer radiometer, herein MATLAB language was adopted to compile a merit function, which was used as the evaluation standard of inversion accuracy of the spectral curve of a blackbody at a temperature of 3000k. The MATLAB genetic algorithm and the pattern search algorithm toolbox were employed to solute the minimal value of function that was the optimal spectral channel distribution of the transfer radiometer. Finally, influence factors of the number of spectral channels, including the shifting of center wavelength, the broadening of bandwidth and measurement system error, were analyzed. The results show that the spectral inversion accuracy of is 0.12%, when the shifting of center wavelength does not exceed 0.2 nm, the broadening of bandwidth is not more than 0.02 nm, and the system error is less than 0.1%. This study can guide the design of transfer radiometers and has a great significance to improve the calibration accuracy of earth imaging spectrometers.

Key words: imaging spectrometer; transfer radiometer; optimal selection channel; inversion accuracy; the genetic algorithm

收稿日期: 2017-03-20; 修订日期: 2017-05-04.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2015AA123703); 国家自然科学基金资助项目 (No. 41474161)

1 引言

地球成像光谱仪的高精度定标是获取高品质地球遥感数据产品的重要前提。为满足精细化定量遥感数据的要求,在太阳反射谱段地球成像光谱仪的绝对辐射定标精度需要达到 1%。现行的在轨辐射定标方法主要有两种:一种是基于黑体、标准灯等标准源的定标方法;另一种是基于空间低温绝对辐射计等标准探测器的定标方法。目前,常用的黑体辐射标准源的不确定度为 1%~3%^[1],难以满足成像光谱仪 1% 的定标精度要求。20 世纪 90 年代国际标准化组织和发达国家开始以低温辐射计为基础建立新型的高精度光谱辐射初级标准,其精度已经达到 0.01%~0.02%^[2]。因此建立以空间低温绝对辐射计作为初级标准的辐射定标方法是实现地球成像光谱仪高精度辐射定标的基础。

基于空间低温绝对辐射计的辐射定标基准传递链路是“空间低温绝对辐射计—传递辐射计—太阳漫反射板—地球成像光谱仪”。其中地球成像光谱仪是高光谱仪器,光谱通道数多达上百个,例如美国 EO-1 卫星上的 HYPERION 成像仪^[3]、HIS (Hyperspectral Imager)^[4],德国的 EnMAP 高光谱成像仪^[5]等;即使是中分辨率地球成像光谱仪也有几十个光谱通道,例如 MODIS^[6]。特别是近年来英国的 NPL 和美国 NASA 提出的 TRUTHS^[7] 和 CLARREO^[8] 计划,光谱分辨率和定标精度要求越来越高。而传递辐射计是多光谱仪器,在相应的波段(可见近红外)最多只有十几个通道,例如 SXR、SWIR、PTR 等。因此在使用传递辐射计对地球成像光谱仪进行定标时,就涉及多光谱数据对高光谱数据的反演问题,数据反演精度会直接影响地球成像光谱仪的定标精度。

为了实现地球成像光谱仪 1% 的定标精度,本文基于空间低温绝对辐射计,以传递辐射计作为二级标准,卤钨灯照明漫反射板作为传递光源,实现了在轨对地球成像光谱仪全谱段的高精度定标。为了实现卤钨灯高光谱数据的高精度反演,采用 MATLAB 遗传算法工具箱对传递辐射计的光谱通道分布进行优化设计^[9],并对误差源进行仿真分析,实现了 0.1% 的光谱反演精度,提高了

地球成像光谱仪的辐射定标精度。

2 辐射定标原理

目前,在标准探测器定标成像光谱仪的过程中,大多采用太阳直射漫反射板产生的朗伯光作为定标光源,使用传递辐射计和地球成像光谱仪同时观测漫反射板,实现传递辐射计对地球成像光谱仪的辐射定标,例如欧空局的 HRIS (High Resolution Imaging Spectrometer)^[10-11]。然而空间高能粒子、宇宙射线和太阳的紫外辐射会引起空间太阳漫反射板的衰减^[12],导致太阳漫反射板的二向反射率的变化,从而产生不可预期的定标误差,例如 MODIS 上的太阳漫反射板在 0.41 μm 处的年平均衰减率达 10%,在 0.47 μm 和 0.53 μm 处相应的年衰减率分别为 7% 和 4.5%^[13]。而且太阳光谱曲线不光滑,会导致在使用传递辐射计的多光谱数据对太阳光谱曲线的反演精度难以提高。这两方面都会降低地球成像光谱仪全谱段的定标精度。

因此,本文结合当前标准探测器法定标地球成像光谱仪的过程中存在的不足,提出使用“卤钨灯+漫反射板”作为星上定标光源,避免太阳直射漫反射板所引起的空间衰减。已经有研究证明,卤钨灯的光谱辐射曲线在空间是整体衰减的,在可见近红外光谱区保持光滑^[14],可以实现高精度的光谱曲线反演,为实现地球成像光谱仪全谱段的高精度定标。

地球成像光谱仪的定标过程如图 1 所示。在空间绝对低温辐射计定标传递辐射计的过程中使用激光二极管组作为定标光源^[15],激光二极管可以产生功率稳定的单色光,实现传递辐射计的高精度定标。在传递辐射计定标地球成像光谱仪的过程中,用卤钨灯(黑体)作为定标光源,通过传递辐射计来标定它的若干光谱通道,进而反演出卤钨灯的光谱曲线,再用卤钨灯的光谱曲线定标成像光谱仪的全部光谱通道。

地球成像光谱仪具体的定标过程是用卤钨灯照亮积分球,将积分球的出射光经准直后照射太阳漫反射板,使用传递辐射计和地球成像光谱仪同时观察漫反射板的出射光。其中,传递辐射计经由空间低温辐射计标定,因此就可以实现地球成像光谱仪溯源于空间低温辐射计的高精度星上定标。

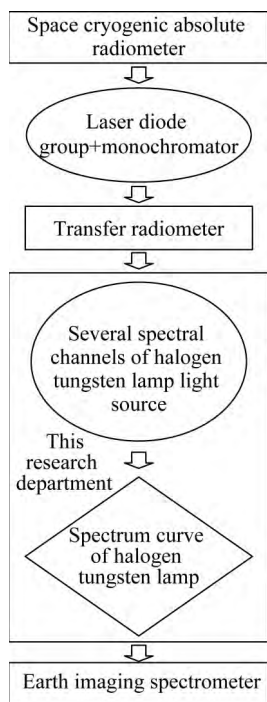


图1 地球成像光谱仪定标流程

Fig.1 Calibration process of earth imaging spectrometer

传递辐射计的结构如图2所示,它主要由陷阱探测器、滤光片辐射计和积分球组成,由此将标准定标和测量传递的功能合二为一。首先利用可溯源至低温辐射计基准的入射光来定标陷阱探测器,再将陷阱探测器作为二级标准定标滤光片辐射计。当光经过积分球开口处的两个精密光阑后,功率基准被转化为辐亮度标准,由此定标后的传递辐射计将整体作为辐亮度传递标准,最终配合漫射板对地球成像光谱仪进行基于辐亮度标准的定标,实现低温辐射计基准的传递。

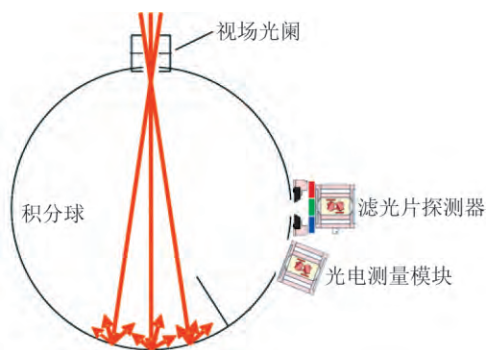


图2 传递辐射计结构原理示意图

Fig.2 Schematic of transfer radiometer

卤钨灯照射漫反射板后的光谱辐亮度曲线的反演是通过传递辐射计的若干光谱通道的示数 V_t 和相应的光谱响应度 ρ_t , 以及传递辐射计本身的参数: 入射口径 A_t 、视场角 ω_t 和传递辐射计的传递函数 τ_t , 计算求出太阳漫反射板的辐亮度 L_s :

$$L_s = \frac{V_t}{\rho_t \times A_t \times \omega_t \times \tau_t}. \quad (1)$$

根据式(1)所求的若干卤钨灯积分球光源照射太阳漫反射板的光谱辐亮度值 L_s , 即图3中的十字线表示, 通过插值算法求出太阳漫反射板的光谱曲线 $L(\lambda)$, 如图3所示。根据曲线就可以读出成像光谱仪所有通道波长处的辐亮度值 L_{sp} , 再根据成像光谱仪各通道的读数 V_{sp} 以及成像光谱仪的入射口径 A_{sp} 、视场角 ω_{sp} 和传递函数 τ_{sp} , 即可计算出成像光谱仪全部光谱通道的光谱响应 ρ_{sp} 为:

$$\rho_{sp} = \frac{V_{sp}}{L_{sp} \cdot \tau_{sp} \cdot A_{sp} \cdot \omega_{sp}}. \quad (2)$$

从上述光谱曲线反演方法可以看出, 选择较多的光谱通道数能够提高光谱曲线的反演精度, 但光谱通道数的增加会直接提升传递辐射计结构的复杂度, 从而提高了传递辐射计的造价和卫星的发射成本。另一方面光谱通道的波长位置分布也决定着光谱曲线的反演精度, 因此传递辐射计通道的选择直接决定了光谱曲线的反演精度, 进而影响地球成像光谱仪的定标精度。这里以3000 K黑体辐射曲线作为研究对象, 介绍使用MATLAB遗传算法工具箱进行传递辐射计光谱通道优化设计的基本原理以及流程, 并分析在实际应用中波长偏移、带宽展宽和辐射值测量不准对拟合精度的影响, 得出传递辐射计的通道设计要求。

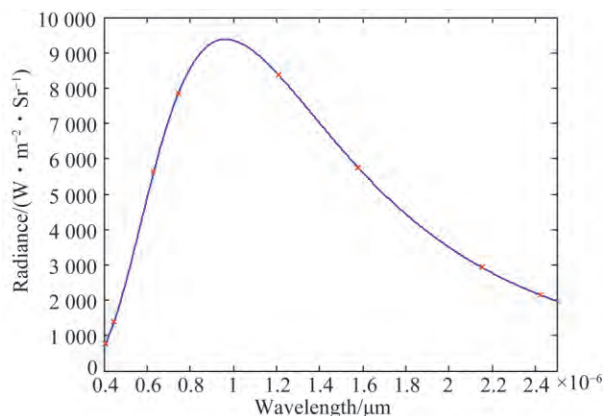


图3 卤钨灯定标曲线

Fig.3 Calibration curve of halogen tungsten lamp

3 算法模型

本文在传递辐射计通道选择上应用 matlab 遗传算法工具箱和模式搜索算法工具箱,研究为了实现光谱曲线 0.1% 的拟合精度所要满足的各项误差指标,为传递辐射计的整体设计提供指导意见。在工程应用中,卤钨灯相当于温度为 3 000 K 的黑体,因此在实验的前期研究工作中使用黑体辐射的理论曲线作为研究对象,选择 400~2 500 nm 的可见近红外光谱区作为研究范围。为了便于分析,假定传递辐射计的滤光片的透过率函数是带宽为 3 nm 的矩形函数 $T(\lambda)$ 。再结合黑体辐射的普朗克表达式 $M(\lambda, T)$,以 1 nm 的光谱分辨率来生成理论光谱曲线 $\varphi(\lambda)$ 。

传递辐射计光谱通道的优化就是寻求拟合光谱曲线与真实光谱曲线的均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 满足反演精度要求时的多光谱通道组合,因此目标函数的构建过程如下:首先用插值算法拟合光谱曲线,再用拟合的光谱曲线与真实曲线比对,计算 RMSE。

光谱曲线重建时,假定传递辐射计光谱通道的中心波长为:

$$\lambda = [\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \cdots \lambda_n], \quad (3)$$

其中 n 是传递辐射计的光谱通道数。

对应的光谱辐亮度值为:

$$L = [L_1 L_2 L_3 \cdots L_n]. \quad (4)$$

对应的插值波长为:

$$A = l_d : i : l_t, \quad (5)$$

其中: l_d, l_t 分别是光谱范围的下限, i 是光谱插

值的分辨率。

则计算得到重建光谱曲线为:

$$L_\lambda = \text{interp1}(\lambda, L, A, 'spline'). \quad (6)$$

已知在波长 A 处的光谱辐亮度真值为 L_j , 则拟合重建光谱曲线与真实光谱曲线的均方根误差来表示光谱反演精度的整体评价标准为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum \left(\left(\frac{L_\lambda - L_j}{L_j} \right)^2 \right)}{\text{length}(A)}}, \quad (7)$$

其中 $j = 1, 2, 3, \cdots, \text{length}(A)$ 。

式(7)就是遗传算法所要优化的目标函数,求得式(7)满足定标不确定度要求的对应 λ 数组,就是对地球成像光谱仪定标的传递辐射计光谱通道的最优设计。

传递辐射计在实际使用中会受到各方面因素的影响,导致各个方面的性能与设计指标出现偏差,因此需要分析传递辐射计各个误差源的允许范围。

本文的误差评价主要是从全局考虑的,故以式(7)作为光谱曲线反演精度的评价标准,该式反应了 400~2 500 nm 整个光谱范围内以 1 nm 为分辨率的各个波长处的平均相对误差,整体评价了多光谱数据对整个光谱曲线的反演精度。在实际工程应用中,也可以根据定标对象(地球成像光谱仪)的具体光谱通道进行优化评价,以便找出对所需定标波长处反演精度最高的传递辐射计通道组合。本文只分析整个光谱范围的误差精度,因此选择式(7)作为评价指标。

由式(7)可知,拟合重建光谱曲线与真实光谱曲线的 RMSE 的不确定度为:

$$\delta(RMSE) = \sqrt{\left(\frac{\partial \text{sqr}}{\partial A} \right)^2 \delta(A)^2 + \left(\frac{\partial \text{sqr}}{\partial L_j} \right)^2 \delta(L_j)^2 + \left(\frac{\partial \text{sqr}}{\partial L_\lambda} \right)^2 \delta(L_\lambda)^2 + \delta}, \quad (8)$$

其中: $\delta(RMSE)$ 表示 RMSE 在选定光谱通道的情况下的拟合误差; $\delta(A)$ 和 $\delta(L_j)$ 分别是插值波长 A 和波长 A 处的光谱辐亮度真值 L_j 的误差。因为通道数是确定的数值,那么 $\delta(A) = 0$, 光谱辐亮度真值 L_j 也是确定的理论值,那么误差

$\delta(L_j) = 0$ 。忽略误差的相关项 δ , 所以有:

$$\delta(RMSE) = \frac{\partial \text{sqr}}{\partial L_\lambda} \delta(L_\lambda), \quad (9)$$

其中 $\delta(L_\lambda)$ 是根据选定的光谱通道 λ 经过插值算法得到的反演光谱辐亮度值的不确定度。由式(6)可知:

$$\delta(L_\lambda) = \sqrt{\left(\frac{\partial \text{interp1}}{\partial \lambda} \right)^2 \delta(\lambda)^2 + \left(\frac{\partial \text{interp1}}{\partial L} \right)^2 \delta(L)^2 + \left(\frac{\partial \text{interp1}}{\partial A} \right)^2 \delta(A)^2}, \quad (10)$$

其中: $\delta(A) = 0$; $\delta(\lambda)$ 表示传递辐射计通道选择引入的误差,包括传递辐射计通道数引入的影响 $\delta(\lambda_1)$ 和光谱通道中心波长偏移导致的误差 $\delta(\lambda_2)$; $\delta(L)$ 表示传递辐射计的测量误差,主要包括传递辐射计的滤光片的光谱展宽所引起的误差 $\delta(L_1)$, 以及传

递辐射计本身测量不准造成的误差 $\delta(L_2)$ 。

4 误差源仿真分析

分析传递辐射计设计时的通道数以及在轨运

行期间中心波长偏移、带宽展宽、辐射测量不准对光谱曲线反演精度的影响。由于各个误差对反演精度的贡献不同,作用方向有可能相反,因此本文提出在整体光谱范围内单个误差源造成的反演曲线拟合误差不高于0.1%、各波长的最大误差不高于0.5%时,计算定标环境参数,为传递辐射计的误差源综合作用时的参数设计提供参考。最后在3个误差项的综合作用下,得到综合误差不大于0.15%,拟合相对误差不大于0.3%时的参数设计值。

4.1 传递辐射计通道数 $\delta(\lambda_1)$ 的影响

首先以3 000 K黑体作为研究实例,计算反演精度随通道数的影响,其光谱分辨率为1 nm,通道带宽是3 nm。

从表1可以看出当传递辐射计的通道数由5变为6时,光谱反演精度提高了17倍,通过增加传递辐射计的光谱通道,卤钨灯全谱段的拟合精度会显著提高;但是当通道数再继续增加时,卤钨灯全谱段的拟合精度提高变缓,因此单纯通过增加传递辐射计的光谱通道数来提高全谱段光谱曲线的拟合精度,会逐渐逼近一个极限值。同时考

$$\lambda_1 = [400.61 \quad 457.66 \quad 664.53 \quad 671.63 \quad 1\,293.43 \quad 1\,520.63 \quad 2\,235.91 \quad 2\,381.21],$$

$$\lambda_2 = [421.33 \quad 494.08 \quad 689.02 \quad 1\,250.82 \quad 1\,442.87 \quad 1\,665.90 \quad 2\,198.27 \quad 2\,434.42],$$

$$\lambda_3 = [444.16 \quad 596.02 \quad 601.04 \quad 753.16 \quad 1\,172.64 \quad 1\,448.81 \quad 2\,259.63 \quad 2\,449.12].$$

这3个解是随机选取的,遗传算法解之间的差别很小,这是因为计算机的精度限制,以及遗传算法初始值选取的随机性造成的,但遗传算法有能力把该问题的解收敛到最优值附近的小范围

$$\lambda = [408 \quad 447 \quad 630 \quad 746 \quad 1\,211 \quad 1\,580 \quad 2\,153 \quad 2\,427].$$

此时 $RMSE = 7.70 \times 10^{-4}$ 。该最优解的拟合相对误差如图4所示,拟合光谱曲线与真实光

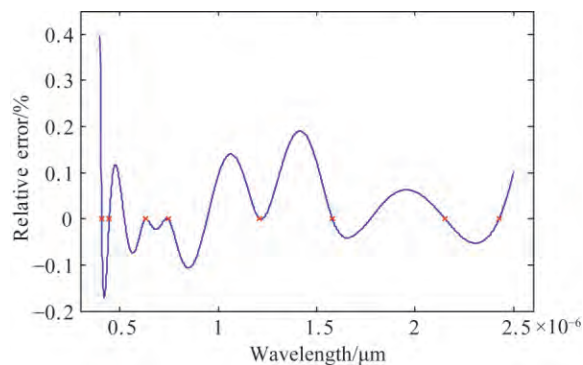


图4 相对拟合误差曲线

Fig. 4 Fitting curve of relative error

考虑增加传递辐射计通道数所带来的结构复杂度和经济成本的提高,一味地通过增加通道数来提高精度是不可取的,因此本文通过优化传递辐射计的光谱通道分布,以期使用最少的通道数来满足拟合精度的要求。表1为通过遗传算法工具箱得到的光谱反演精度与通道数的关系,由表可知选择8个光谱通道即可满足拟合精度0.1%的设计要求。

表1 光谱反演精度与通道数的关系

Tab. 1 Relationship between spectral inversion accuracy and number of channels

Number of channels	Inversion accuracy/%
5	7.079
6	0.413
7	0.188
8	0.077
9	0.037
10	0.032

首先分析8个光谱通道的运行结果。此时遗传算法的运行结果如下:

内^[16-17],再配合直接搜索工具箱对其优化即可得到最优解^[17]。

通过模式搜索工具箱对遗传算法得到的3个解进行优化,得到:

谱曲线如图5所示。

从图5可以看出,在不考虑传递辐射计使用

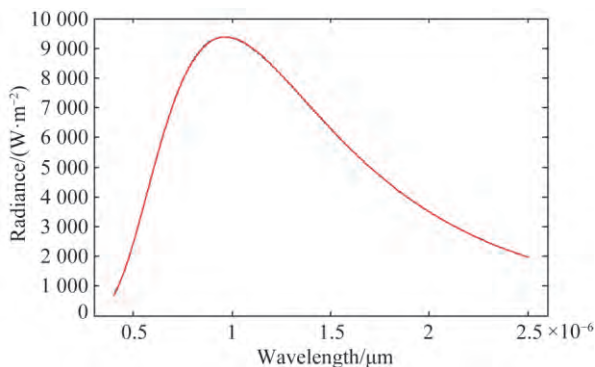


图5 拟合光谱曲线与真实光谱曲线

Fig. 5 Fitting and real spectral curves

过程中任何误差的情况下,使用 matlab 遗传算法工具箱计算结果的反演曲线与真实曲线几乎是重合的,拟合精度达到了 10^{-4} 量级。由图 4 可以看出,单点波长最大的拟合误差出现在 400 nm 处,此处拟合光谱曲线的值与真实值的误差为 0.396 6%,只有 400~404 nm 的拟合误差大于 0.2%,其他波长的单点误差都在 $\pm 0.2\%$ 以内。全谱段综合误差为 0.077%,满足全谱段光谱反演精度小于 0.1% 的要求。

4.2 波长偏移 $\delta(\lambda_2)$ 的影响

传递辐射计通过若干滤光片进行光谱筛选,滤光片在空间工作时会因为太阳紫外辐射、空间高能粒子等产生带宽展宽和中心波长偏移,这些都会影响多光谱数据反演光谱曲线的精度,进而对成像光谱仪的辐射定标造成不利的影响,由波长偏移引起的误差如图 6 所示。

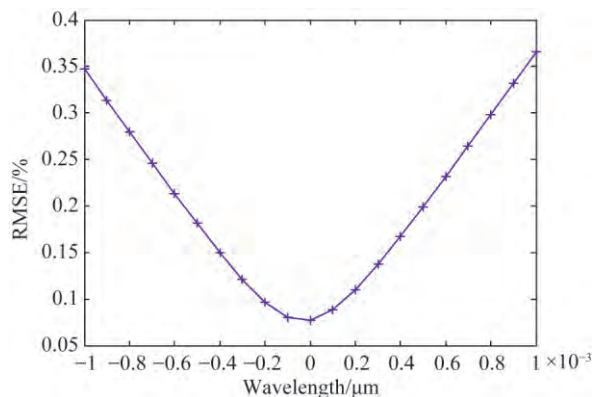


图 6 中心波长偏移综合误差曲线

Fig. 6 Comprehensive error curve with center wavelength shift

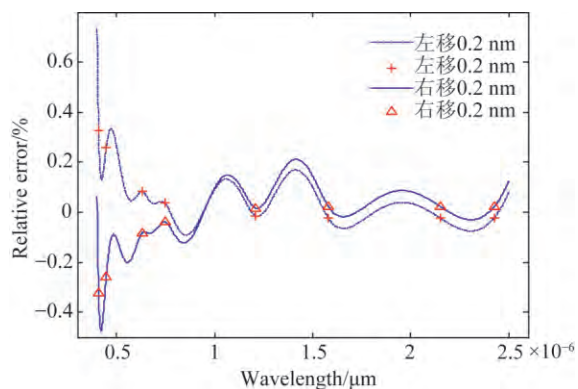


图 7 中心波长左右移 0.2 nm 时的相对误差曲线

Fig. 7 Relative error curves for center wavelength shifting 0.4 nm towards long wave and short wave respectively

由图 6 可以看出,中心波长在左右偏移 0.2 nm 的范围内时,光谱曲线反演的综合误差可以保持在 0.1% 的水平。图 7 为中心波长左移 0.2 nm 和右移 0.2 nm 时全谱段范围内的相对误差。可以看出,在波长右移 0.2 nm 时光谱反演的相对精度全部小于 0.5%,满足实验要求;但是在中心波长左移 0.2 nm 时,在 400~404 nm 光谱反演的相对精度大于 0.5%,而且考虑传递辐射计在轨运行阶段经常出现红移现象,因此要求控制传递辐射计的窄带滤光片的中心波长偏移量不大于 0.2 nm,此处的要求是经过数据校准后的不确定度要求。

4.3 带宽展宽 $\delta(L_1)$ 对光谱反演误差 $\delta(RMSE)$ 的影响

图 8 是带宽展宽对精度的影响。由图可以看出,在带宽展宽小于 0.002 nm 时,光谱反演的综合绝对误差小于 0.1%。

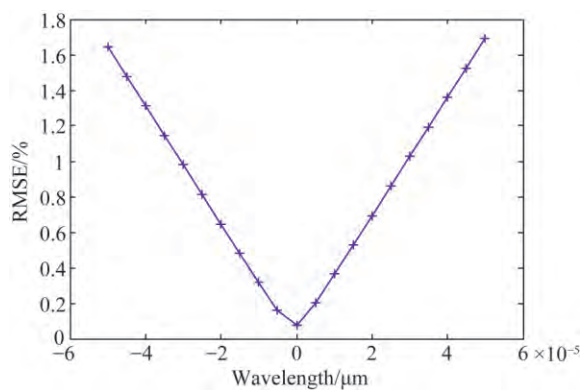


图 8 带宽展宽综合误差

Fig. 8 Comprehensive error curve with bandwidth broadening

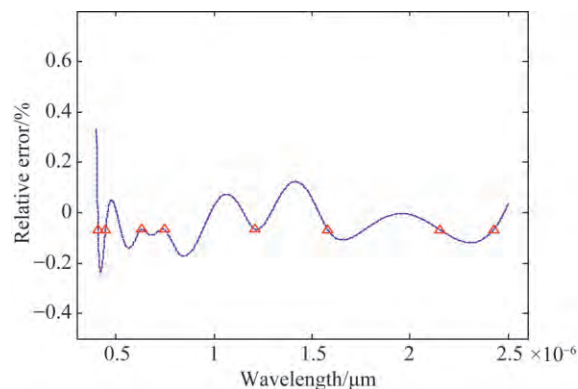


图 9 带宽展宽为 0.002 nm 时的相对误差

Fig. 9 Relative error curve with bandwidth broaden of 0.002 nm

从图9可以看出,带宽的轻微变化会造成光谱反演综合绝对误差的急剧增加,因此带宽的控制精度要很高。当光谱通道发生0.01 nm的展宽时,全波段光谱拟合的均方根误差大约增加了3倍,同时从图中可以看出带宽的变化需要控制在0.002 nm以内,才能够满足卤钨灯定标光源全波段光谱拟合精度达到0.1%的要求,从而保证成像光谱仪的定标精度为1%。因为滤光片带宽一般发生展宽误差,因此当带宽误差展宽为0.002 nm时,光谱反演的相对误差如图9所示,由图可以看出,在0.4~2.5 μm 光谱反演的相对误差都小于0.4%。

从图6和图8可以看出,滤光片带宽的影响是中心波长漂移影响的几十倍,因此对滤光片带宽的精度要求要远高于滤光片中心波长的精度要求。

4.4 传递辐射计本身测量不准误差 $\delta(L_2)$ 对光谱反演误差 $\delta(RMSE)$ 的影响

图10是幅值偏差对通道选择精度的影响。从图10可以看出,在传递辐射计本身的测量值误差小于0.1%时,光谱曲线的综合反演误差近似达到0.1%。

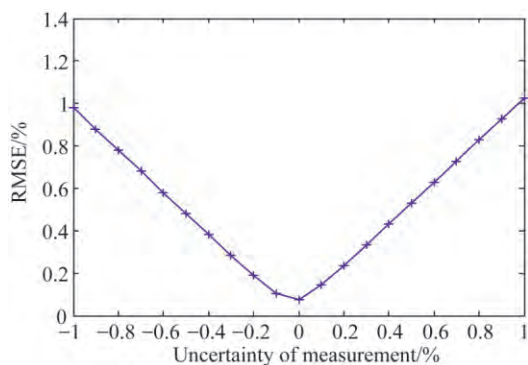


图10 幅值偏差对通道选择精度的影响

Fig. 10 Effect of amplitude deviation on accuracy of channel selection

4.5 综合误差

从以往的航天测量看,滤光片在空间使用时主要发生中心波长向短波方向偏移,带宽展宽,因此可以求得中心向右偏移0.2 nm、带宽展宽为0.02 nm、辐射量的测量偏差为 $\pm 0.1\%$ 时,光谱曲线反演的综合误差为0.12%。在对成像光谱仪进行空间定标时,空间定标光源经过成像光谱

仪后投影在探测器上,这个过程会引入系统本身的噪声。因此在进行光谱反演时,误差达到0.12%即可满足实验要求。在此种情况下光谱曲线反演的相对误差如图11所示,说明在满足以上要求时,整个研究光谱波段0.4~2.5 μm 的相对精度不超过0.5%,满足设计要求。

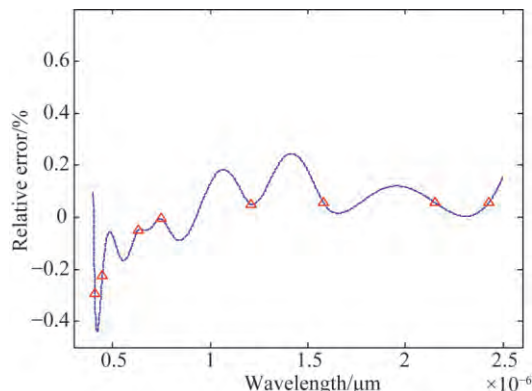


图11 光谱反演的相对精度

Fig. 11 Relative accuracy of spectral inversion

5 结 论

本文使用MATLAB遗传算法工具箱对传递辐射计的光谱通道进行优化,实现了卤钨灯光谱曲线的高精度反演,为实现地球成像光谱仪的高精度定标提供了可能。以黑体辐射作为研究例证,验证了该方法的可行性。分析了光谱通道数、温度、波长偏移对光谱辐射曲线反演精度的影响,说明光谱通道数的增加在一定范围内可以有效地改善拟合精度,但是在超过一定的数量后对反演精度的提高效果并不是很明显,而且会增加传递辐射计结构的复杂度和成本。因此在传递辐射计的设计中,要根据实际所需要的精度选择合适的光谱通道数,通过严格控制波长的偏移量、通道带宽的展宽以及传递辐射计本身对辐亮度值的测量误差来进一步提高光谱的反演精度。计算结果表明,为了实现地球成像光谱仪1%的定标精度,卤钨灯的光谱反演精度应为0.12%,此时要求传递辐射计光谱通道的中心波长向左偏移不超过0.2 nm,带宽展宽不超过0.02 nm,辐射量值测量偏差不超过0.1%。

参考文献:

[1] 王玉鹏,胡秀清,王红睿,等. 可在轨溯源的太阳

反射波段光学遥感仪器辐射定标基准传递链路[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1807-1812.
WANG Y P, HU X Q, WANG H R, et al.. Stand-

- ard transfer chain for radiometric calibration of optical sensing instruments with traceability in solar reflective bands [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23 (7):1807-1812. (in Chinese)
- [2] 李志刚. 基于探测器标准的高精度光谱辐射标准光源[J]. *中国光学*, 2015, 8(6):909-918.
LI ZH G. High accuracy spectroradiometric standard light source based on detector standard [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6):909-918. (in Chinese)
- [3] FOLKMAN M A, PEARLMAN J, LIAO L B, *et al.*. EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration [J]. *SPIE*, 2001, 4151:91.
- [4] MARMO J, FOLKMAN M A, KUWAHARA C Y K, *et al.*. Lewis hyperspectral imager payload development [J]. *SPIE*, 1996, 2819:80-90.
- [5] SANG B, SCHUBERT J, KAISER S, *et al.*. The EnMAP hyperspectral imaging spectrometer: instrument concept, calibration, and technologies [J]. *SPIE*, 2008, 7086:708605.
- [6] XIONG X, CHE N, XIE Y, *et al.*. Four-years of on-orbit spectral characterization results for aqua MODIS reflective solar bands [J]. *SPIE*, 2006, 6361:63610S.
- [7] FOX N P, AIKEN J, BARNETT J J, *et al.*. Traceable radiometry underpinning terrestrial and helio-studies (TRUTHS) [J]. *SPIE*, 2003, 4881:395.
- [8] WU A S, XIONG X X, JIN Z H, *et al.*. Sensitivity of intercalibration uncertainty of the CLARREO reflected solar spectrometer features [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(9):4741-4751.
- [9] ANDERSON N, THOME K, BIGGAR S, *et al.*. Design and validation of a transfer radiometer [J]. *SPIE*, 2008, 7081:708104.
- [10] BLECHINGER F, CHARLTON D E, DAVAN-CENS R, *et al.*. High-resolution imaging Spectrometer (HRIS): optics, focal plane, and calibration [J]. *SPIE*, 1993, 1937:207-224.
- [11] HARNISCH B, FABBRICOTTI M, MEYNART R, *et al.*. HRIS technology development results and their implementation in future hyperspectral imagers [J]. *SPIE*, 1997, 3221:396-411.
- [12] 王英鉴. 空间环境对漫反射板的影响[J]. *空间科学学报*, 2002, 22(1):52-57.
WANG Y J. Effects of space environment on solar diffuser [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2002, 22(1):52-57. (in Chinese)
- [13] XIONG X, ERIVES H, XIONG S, *et al.*. Performance of MODIS solar diffuser and solar diffuser stability monitor [J]. *SPIE*, 2005, 5882:58820S.
- [14] 高静, 计忠瑛, 王忠厚, 等. 空间调制干涉光谱成像仪的星上定标系统稳定性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(4):1013-1017.
GAO J, JI ZH Y, WANG ZH H, *et al.*. Stability analysis of on-board calibration system of spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(4):1013-1017. (in Chinese)
- [15] 任建伟, 麦镇强, 万志, 等. 星上 LED 定标光源的可行性研究[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(3):398-405.
REN J W, MAI ZH Q, WANG ZH, *et al.*. Feasibility of LED light source in spaceborne calibration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3):398-405. (in Chinese)
- [16] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 51-66.
WANG X P, CAO L M. *Genetic Algorithm-Theory, Application And Software Implementation* [M]. Xi'an: Xi'an Jiao Tong University Press, 2002:51-66. (in Chinese)
- [17] 雷英杰, 张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 第 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014:235-274.
LEI Y J, ZHANG SH W. *MATLAB Genetic Algorithm Toolbox and Its Application* [M]. 2nd ed.. Xi'an: Xidian University Press, 2014:235-274.

作者简介:



孙立微(1990—),女,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2013年于吉林大学获得学士学位,主要从事卫星仪器在轨太阳辐射绝对定标及传递辐射计设计的研究。E-mail:ciomp1990@163.com

导师简介:



方伟(1965—),女,辽宁锦州人,博士,研究员,1997年、2005年于中科院长春光机所分别获得硕士和博士学位,现为FY-3卫星太阳辐射监测仪主任设计师,主要从事太阳辐射计量的研究。E-mail:Fangw@ciomp.ac.cn