

文章编号: 1672-8785(2017)06-0019-05

一种用于 2~14 μm 红外光谱辐射计的波长标定方法

刘加庆^{1,2} 韩顺利² 刘磊²

(1. 电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555;

2. 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

摘 要: 针对所研制的基于渐变滤光片的高分辨率宽波段红外光谱辐射计, 提出了一种波长标定方法。首先, 由理论推导给出初始波长, 并对所用渐变滤光片的非线性进行校正。然后采用基于波长基准源的特征峰匹配法进行波长校正, 进而完成波长标定。最后使用激光器对标定精度进行校验。结果表明, 本文方法的标定精度优于 1%。

关键词: 红外光谱辐射计; 渐变滤光片; 宽波段; 波长标定

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.06.004

A Wavelength Calibration Method for 2~14 μm Infrared Spectroradiometer

LIU Jia-qing^{1,2}, HAN shun-li², LIU Lei²

(1. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Qingdao 266555, China;

2. The 41st Research Institute of CETC, Qingdao 266555, China)

Abstract: For a high resolution wide waveband infrared spectroradiometer based on linear variable filters, a wavelength calibration method is proposed. Firstly, the initial wavelength is derived theoretically and the linearity of the linear variable filter used is corrected. Then, the wavelength correction is carried out by the characteristic peak matching based on wavelength reference source so as to complete wavelength calibration. Finally, the calibration accuracy is checked by using a laser. The result shows that the calibration accuracy of the proposed method is better than 1%.

Key words: infrared spectroradiometer; variable filter; wide spectral region; wavelength calibration

0 引言

红外光谱辐射计是一种集光谱仪与辐射计于一身的红外测量仪器, 主要用于获取目标的红外光谱辐射信息。目前, 它已广泛应用于目标识别、大气与环境探测、光电系统测试以及计量等领域, 并受到了相关科学和应用技术研究

的重视。然而现在人们也对红外光谱辐射计的工作波段、光谱分辨率、测量速度和噪声等效温差等核心指标提出了越来越高的要求。由于红外光谱辐射计输出的是没有任何意义的数字码流, 需要经过波长标定、辐射标定等仪器标定工作, 才能得到具有实际物理意义的红外光谱辐

收稿日期: 2017-03-16

基金项目: 电子测试技术重点实验室基金项目 (9140C120301150C12057)

作者简介: 刘加庆 (1986-), 男, 山东日照人, 工程师, 主要从事光电测量仪器方面的研究。

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

射数据。波长标定主要是获取仪器测试数据的波长信息。随着工作波段和光谱分辨率等性能参数的不断优化,人们对波长标定技术提出了新的要求^[1-2]。

1 宽波段红外光谱辐射计

我们研制的高分辨率宽波段红外光谱辐射计由卡塞格林望远模块、光谱分光模块、探测与数据采集模块、电机控制与数据处理模块、工控机以及电源模块等几部分构成(光学结构见图1)。目标的红外辐射经卡塞格林望远系统收集与准直处理后通过斩光器和可变光阑,然后被渐变滤光片分光,并由双色探测器接收;双色探测器产生的电信号经前置放大、次级放大、A/D转换、数据处理后,形成有关目标红外光谱辐射的数字采样数据;接着通过波长标定和辐射标定,便得到目标的红外光谱辐射数据。该辐射计可实现工作波长为 $2 \sim 14 \mu\text{m}$ 、测量波长的光谱分辨率为2%、光谱测量速度为 $0.1 \sim 10$ 转/秒的红外光谱辐射测量。

2 渐变滤光片的光谱分光原理

渐变滤光片是一种特殊的新型超窄带滤光片,其主要特点是各个膜层的厚度沿某一方向均匀增加或减小,使得滤光片的通道中心波长等指标呈线性变化。由于利用干涉原理实现滤光,单个渐变滤光片的最大工作波长不能超过最短工作波长的两倍^[3]。因此,光谱分光系统采用将三片渐变滤光片拼接的方式来实现工作波

长为 $2 \sim 14 \mu\text{m}$ 、测量波长的光谱分辨率为2%的宽波段高精度分光(见图2)。在高精度步进电机的驱动下,渐变滤光片开始运动,使入射光依次通过其波长变化方向上的不同位置。这样即可得到波长依次变化的出射光,从而实现入射光的光谱分光。由位置传感器给出光谱辐射测量起始零位置的基准信号。每次扫描开始时,将其初始化至起始零位置。由图2可知,在光谱辐射测量中,入射光在渐变滤光片上的运动轨迹是一条圆弧,即步进电机的运动角度与光谱分光波长之间成非线性关系。因此需要经过复杂的数学运算和推导,才能给出两者之间的数学描述。受渐变滤光片自身缺陷、系统装配误差和电机控制精度等因素的影响,测量光谱波长的理论值与实际值之间存在偏差,所以需要进行波长标定。

3 光谱辐射计的波长标定方法

针对宽波段光谱辐射计的特点,本文提出了一种波长标定方法。首先,通过理论推导给出步进电机的步进数所对应的光谱分光初始波长,并对渐变滤光片的非线性进行校正;然后采用特征峰对比法校正初始波长,给出最终的波长;最后利用激光器校验标定精度。

3.1 通过理论推导给出初始波长

基于光谱辐射计的光机系统设计,通过理论推导可给出驱动渐变滤光片运动的步进电机的步进数所对应的光谱分光初始波长。

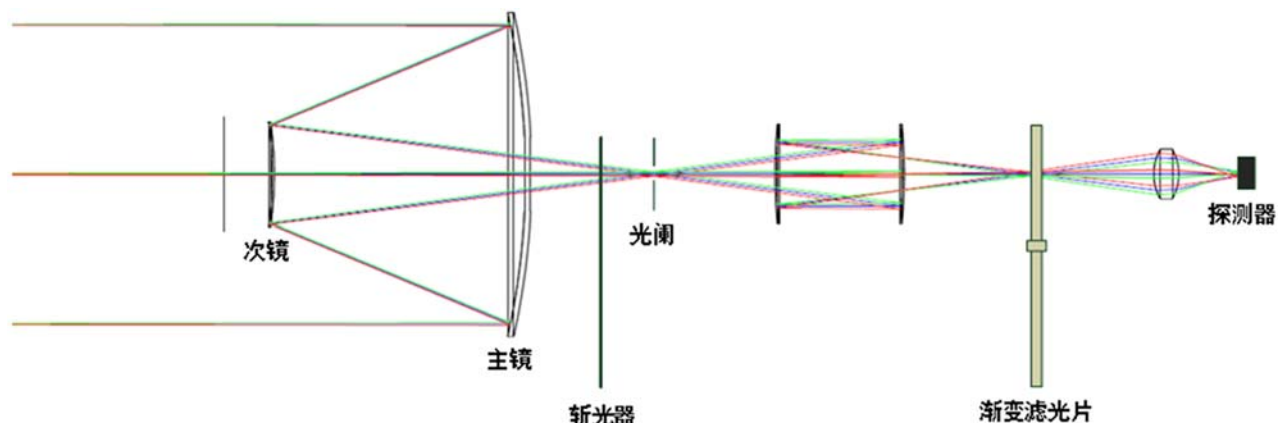


图1 红外光谱辐射计的光学结构图

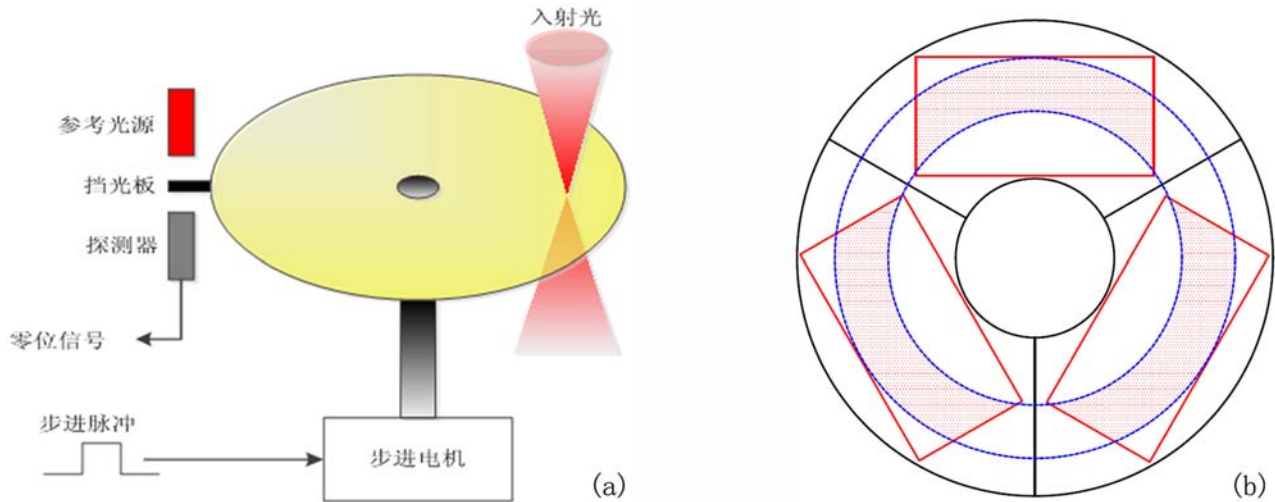


图2 基于渐变滤光片的光谱分光: (a) 原理图; (b) 装配图

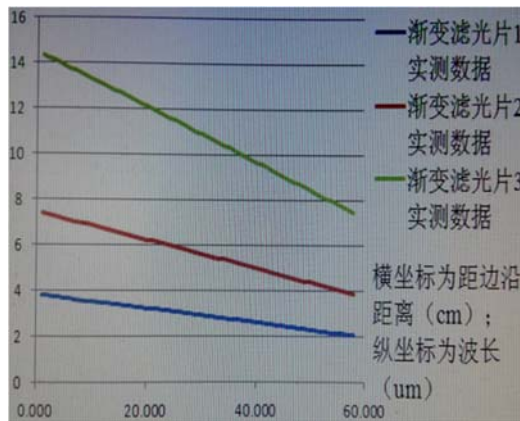


图3 渐变滤光片的实测波长

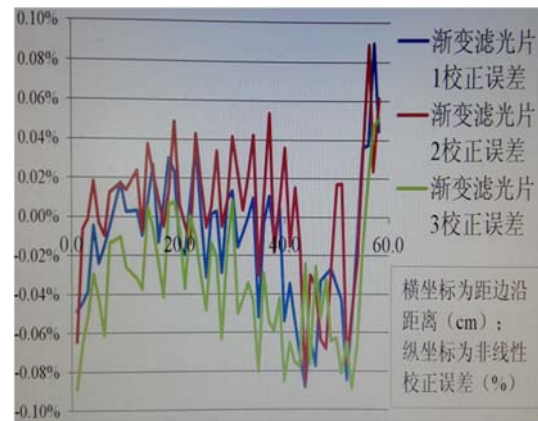


图4 非线性校正的误差

3.1.1 渐变滤光片的非线性校正

考虑到渐变滤光片的透过波长与透光位置距边沿的距离之间可能不是严格成线性的, 首先用波长计测试了渐变滤光片的线性度, 并等间隔地选取了渐变滤光片上的60个位置。图3所示为3片渐变滤光片的测试结果。可以看出, 渐变滤光片存在非线性现象。经研究, 本文提出了一种基于最小二乘拟合的渐变滤光片非线性校正算法。首先, 由式(1)计算非线性校正系数, 然后利用式(2)进行非线性校正。图4所示为非线性校正的误差。结果表明, 通过采用二次非线性校正系数, 即可将校正误差控制在0.1%以下。

$$\Delta_{min} = \lambda_{mt} - \sum_{i=1}^n a_{i-1} \ln g^{i-1} \quad (1)$$

$$\lambda_{NLC} = \sum_{i=1}^n a_{i-1} \ln g^{i-1} \quad (2)$$

式中, λ_{mt} 为实测波长数组; $\ln g$ 为相应的透光位置距边沿的距离数组; a_{i-1} 为非线性校正系数; λ_{NLC} 为校正波长。

3.1.2 推导步进电机的步进数所对应的光谱分光初始波长

图5所示为光谱辐射测量时入射光在渐变滤光片上的运动轨迹。已知光斑运动轨迹的半径为 R , 渐变滤光片的总长度为 L , 渐变滤光片的中心位置相对于起始零位置的偏移角为 θ , 渐变滤光片上的入射光斑相对于滤光片中心的偏移角为 $\Delta\theta$ (顺着光斑运动方向的偏移为正, 否则为负), 则入射光斑距渐变滤光片边沿的距离 D 可由式(3)给出:

$$D = \frac{L}{2} + R \cdot \sin(\Delta\theta) \quad (3)$$

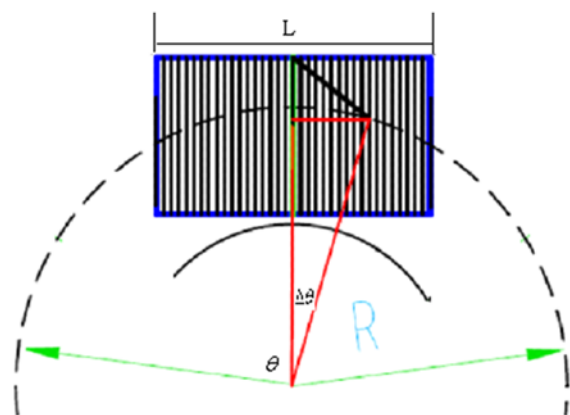


图 5 渐变滤光片上的光斑运动轨迹

经非线性校正的滤光片透光位置的理论初始波长为

$$\lambda_{cal} = \sum_{i=1}^n a_{i-1} D^{i-1} \quad (4)$$

假定用步进电机驱动渐变滤光片完成一次测量, 旋转一圈所对应的总步进数为 N , 相应的总角度为 2π , 则单步对应角度为

$$\theta_{sp} = 2\pi/N \quad (5)$$

在渐变滤光片的透光位置上, 相应步进数(同样以起始零位置为步进计数零点)为

$$n_{\theta} = (\theta + \Delta\theta)/\theta_{sp} \quad (6)$$

通过联立式(4)和式(6)可以给出步进电机的步进数所对应的光谱分光初始波长, 此时即可得

到测量光谱辐射数据的初始波长。

3.2 用特征峰匹配法校正初始波长

考虑到步进电机固有的步进误差、透光位置的定位误差、光学系统缺陷(由系统设计参数引入的谱线位置漂移)、光机装调误差以及电子学系统漂移等都会造成理论计算值偏离真实波长, 因此需要对初始波长进行校正, 以给出正确波长。初始波长校正工作在实验室中完成, 主要是给出滤光片的通道中心波长与透光位置的对应关系。目前实验室常用的光谱定标方法包括谱线灯方法、单色仪扫描法和特征峰吸收法^[4]。根据朗伯-比尔定律, 特征峰匹配法利用红外吸收气体所产生的红外吸收谱, 选择特定的吸收峰进行定标, 具有可用参考谱线多、谱线谱宽窄、使用灵活方便等优点^[5-6]。因此, 本文采用特征峰匹配法对初始波长进行校正。针对红外光谱辐射计的宽工作波段, 选用 HBr、CO 和 NH₃ 作为标定基准(见图 6)。

4 波长标定实验及分析

图 7 所示为红外光谱辐射计波长标定的实验装置。具体的标定流程如下:

(1) 分别测量装有 HBr、CO 和 NH₃ 的气体

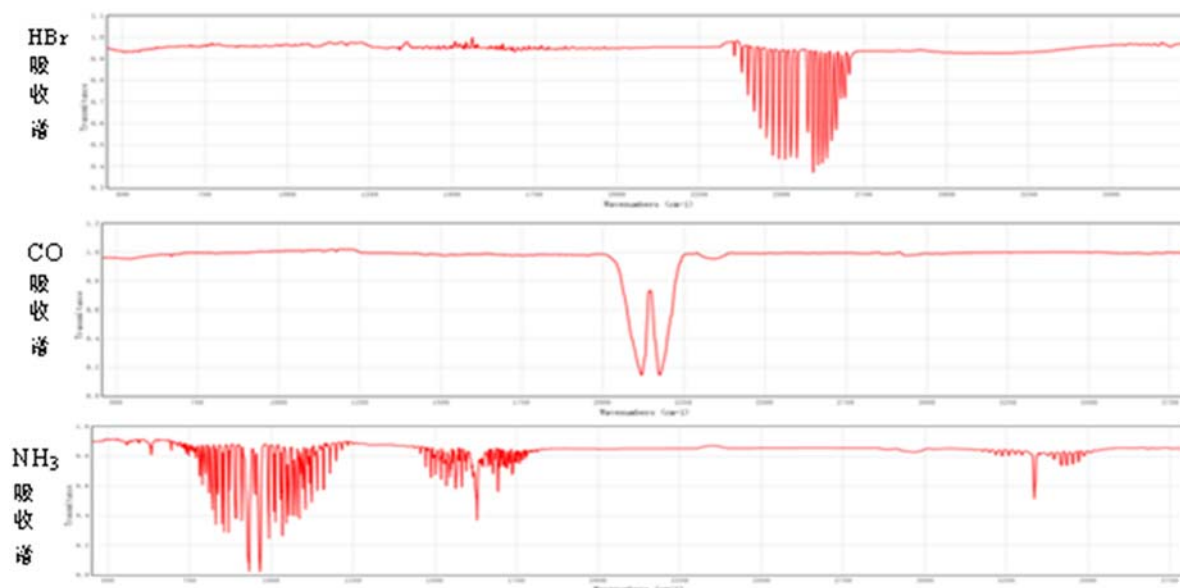


图 6 定标气体的吸收谱



图 7 红外光谱辐射计波长标定的实验装置

吸收池的吸收谱。

(2) 选择适当的吸收谱特征峰, 并将其与基准值进行对比。

(3) 基于选定的吸收谱特征峰的实测值与基准值 (见表 1), 利用式 (7) 计算校正系数 a 和 b 。

$$y = a \cdot x + b$$

(7)

表 1 标定试验的实测波长数据

吸收线标号	特征峰基准值	实测值
1	3.8119	3.8326
2	4.0437	4.0652
3	4.5914	4.6230
4	6.1500	6.1685
5	8.9116	8.9095
6	12.0387	12.0359

(4) 利用校正系数校正由理论计算给出的初始波长。

(5) 波长标定后, 使用 $3.39\text{ }\mu\text{m}$ 和 $10.69\text{ }\mu\text{m}$ 激光器对波长标定精度进行校验 (见图 8)。结果表明, 本文方法的标定精度优于 0.1% 。



图 8 激光器校验结果: (a) $3.39\text{ }\mu\text{m}$; (b) $10.69\text{ }\mu\text{m}$

5 结束语

根据高分辨率宽波段光谱辐射计的标定需要, 本文提出了一种波长标定方法, 并对其进行了实验验证。结果表明, 本文方法的波长标定精度优于 0.1% , 完全能够满足工作波段为 $2\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 、测量波长的光谱分辨率为 2% 的红外光谱辐射计的标定需要。同时, 该方法对类似仪器也具有一定的参考意义。

参考文献

[1] Joseph S A, David L S. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook (1993 Edition) [M]. Washington DC: ERIM/SPIE Optical Engineering Press, 1993.

[2] Dario C, Amir G, Robert A B. New User Interface and Features of the SR 5000: Revival of Infrared CVF-based Spectroradiometry [C]. SPIE, 2004, 5431: 46–56.

[3] 陈涛, 罗崇泰, 刘宏开, 等. 多光谱带通线性渐变滤光片的研制 [J]. 光电工程, 2012, 34(7): 72–75.

[4] Robinson B F. Performance Evaluation and Calibration of a Modular Multiband Radiometer for Remote Sensing Field Research [J]. Technical Symposium, 1982, 308(6): 146–157.

[5] Wolfe W L, Zississ G J. The Infrared Handbook [M]. Washington DC: The Office of Naval Research, 1978.

[6] 周世椿. 高级红外工程导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.