文章编号： 1672-8785(2017)07-0022-09

一种基于渐变滤光片的2~14 μm常温红外光谱辐射测试技术

刘加庆[1,2] 韩顺利[2] 刘 磊[2] 胡德信[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：研究了一种基于渐变滤光片的2~14 μm常温红外光谱辐射计，实现了2%测量波长的分辨率。针对单片渐变滤光片的波长范围限制，采用三块渐变滤光片拼接的方式与光谱融合算法，实现了2~14 μm宽波段覆盖。采用精密步进电机和位置传感器方案进行精密光谱分光，实现了2%测量波长的光谱分辨率。采用斩光和数字正交锁相放大方案，实现了微弱红外光谱信号的探测。用于驱动渐变滤光片的步进电机采用近似函数控制算法和阶梯变频加速型运动律控制方案，实现了高精度步进控制和0.1转/s~10转/s的不同光谱测量速度。最后，简要介绍了红外光谱辐射计的标定方法及结果。

关键词：常温红外光谱辐射计；渐变滤光片；锁相放大；步进电机变频控制；光谱辐射计标定

中图分类号： TN 216 **文献标志码**： A **DOI**: 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.07.004

An 2~14 μm Ambient Infrared Spectroradiometric Measurement Technology Based on Linear Variable Filter

LIU Jia-qing[1,2], HAN Shun-li[2], LIU Lei[2], HU De-xin[2]

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

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

Abstract: A 2 to 14 μm ambient infrared spectroradiometer based on linear variable filters with spectral resolution of 2% measurement wavelength is studied. According to the wavelength range limit of a single slice gradient filter, the coverage of the 2 to 14μm wide band is realized by combining three pieces of variable filters with a spectrum fusion algorithm. By using a scheme containing a fine stepping motor and a position sensor to carry out fine spectrum splitting, the spectral resolution of 2% measurement wavelength is realized. By using the chopping and digital orthogonal lock-in amplifier scheme, the detection of weak infrared spectral signals is realized. For a stepping motor used to drive variable filters, the approximate function control algorithm and step frequency conversion acceleration motion law are used. Thus, fine step control and 0.1scan/second to 10 scan/second variable spectrum scanning speed are achieved. Finally, the calibration method and result of the spectroradiometer are presented.

Key words: ambient infrared spectroradiometer; variable filter; lock-in amplifier; stepping motor frequency conversion control; spectroradiometer calibration

收稿日期：2017–03–16

基金项目：电子测试技术重点实验室基金 (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

0 引言

红外光谱辐射计是一类集光谱仪与辐射计于一身的红外测量仪器。根据分光原理，它大致可分为滤光片、棱镜、光栅和傅里叶变换四类，每类都有各自的优缺点，适用于不同的应用场合。其广泛的应用大致可分为三类：(1) 基于红外光谱特征的目标识别；(2) 天空辐射和长路径 (1 km 到 44 km) 大气透过率的开路测量；(3) 诸如前视红外成像系统、光电对抗系统等光电系统的相关测试 [1−3] 。

在过去的三十年里，商用红外光谱辐射计由低分辨率发展到高分辨率 (0.1%~3% 测量波长) 。以 CI 公司生产的 SR5000 系列、HGH 公司生产的 RAD 系列、ABB 公司生产的 MR 系列、Bruker 公司生产的 EM 系统为代表的产品大多采用滤光片或干涉仪作为分光器件。目前，国内也开展了相关研究工作，但这些研究工作大多以理论与原理样机为主 [4] ，商业化的 2~14 μm 常温红外光谱辐射计主要依赖进口。

本文通过分析与借鉴国外现有的商用红外光谱辐射计方案，面向市场和国家需求，开展基于渐变滤光片的 2~14 μm 常温红外光谱辐射测试技术的研究，研制成功了一种商用的常温红外光谱辐射计，能实现光谱测量、辐射测量、透过率测量、反射率测量等功能。其主要技术指标与国外同类产品类似，见表 1 。

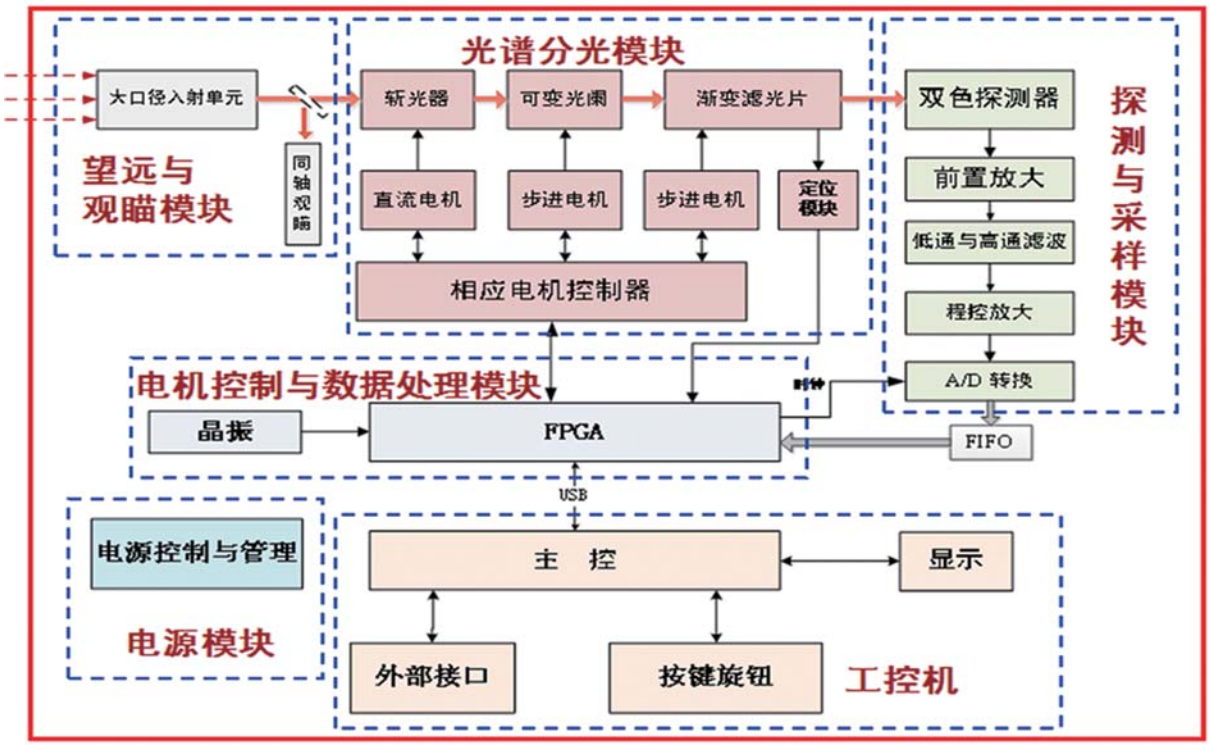
表 1　红外光谱辐射计的主要性能指标

指标	参数
光谱范围	2~14 μm
光谱分辨率	2%
光谱扫描速度 (转 /s)	0.015 、 0.1 、 1 、 5 、 10
噪声等效温差	≤20 mk@13μm,1 Hz 带宽， 300 K 黑体
视场 (mrad)	0.3 、 0.5 、 1 、 1.5 、 2.4 、 4 、 5 、 6
入瞳口径	120 mm
F♯	3.3
聚焦范围	2.5 m 至无穷远
饱和辐射	与探测器有关， 5.4 mW(典型值， InSb 探测器)
最高斩光频率	1800 Hz
外形尺寸 (宽 × 高 × 深)	光单元： ≤400 mm×400 mm×800 mm 主机： ≤319 mm×177 mm×300 mm

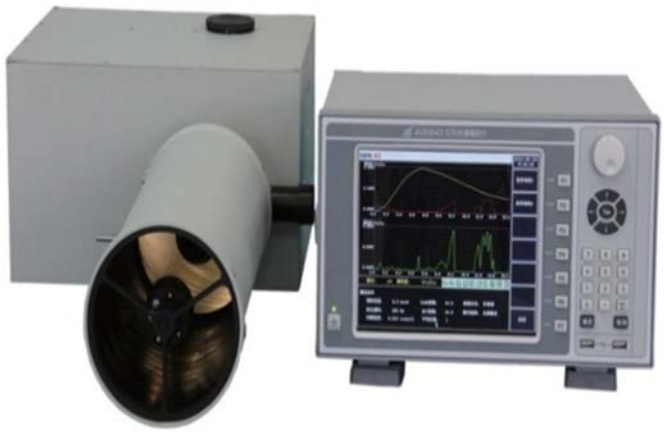
1 系统组成及工作原理

红外光谱辐射测试系统主要由望远与观瞄模块、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、电源模块等组成，如图 1 所示。望远与观瞄模块用于目标观瞄与目标入射辐射的收集准直，其采用同轴观瞄镜实现目标的高精度观瞄，采用 120 mm 大口径卡塞格林望远系统并在主次镜上镀金膜，以提高目标红外辐射的收集与准直能力和简化系统结构。光谱分光模块用于实现高精度光谱分光，其采用渐变滤光片与高精度步进电机实现 2~14 μm 宽波段红外辐射分光，渐变滤光片与可变光阑分别由步进电机控制，斩光器由直流电机控制。探测与采集模块用于实现光谱分光信号的探测与数据获取，采用 HgCdTe/InSb 双色探测器实现 2~14 μm 宽光谱探测。双色探测器采用液氮制冷，以提高探测灵敏度。双色探测器输出的模拟信号经多级滤波与放大、模数转换后，形成光谱采样数据流。电机控制与信号处理模块基于 FPGA 实现，负责电机控制与采样数据处理。工控机采用 Windows Xp 操作系统，用作整机软件的运行平台，整机软件如图 2 所示。

红外光谱辐射计的工作原理是，目标的红外辐射由卡塞格林望远系统收集并准直，经斩光器、可变光阑、渐变滤光片光谱分光后，由双色探测器转换为电信号，再经前置放大、次级放大、 A/D 转换、锁相放大等步骤，产生与目标入射红外光谱辐射相对应的 ADC 码流，然后对其进行波长定标和辐射定标，得到目标的红外光谱辐射数据。

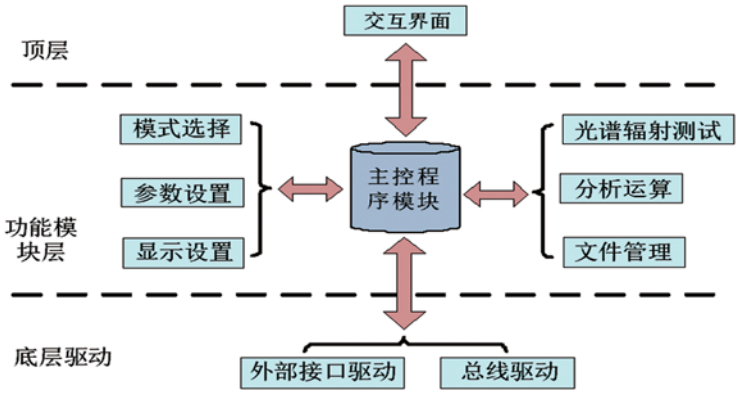


(a) 红外光谱辐射计方案框图

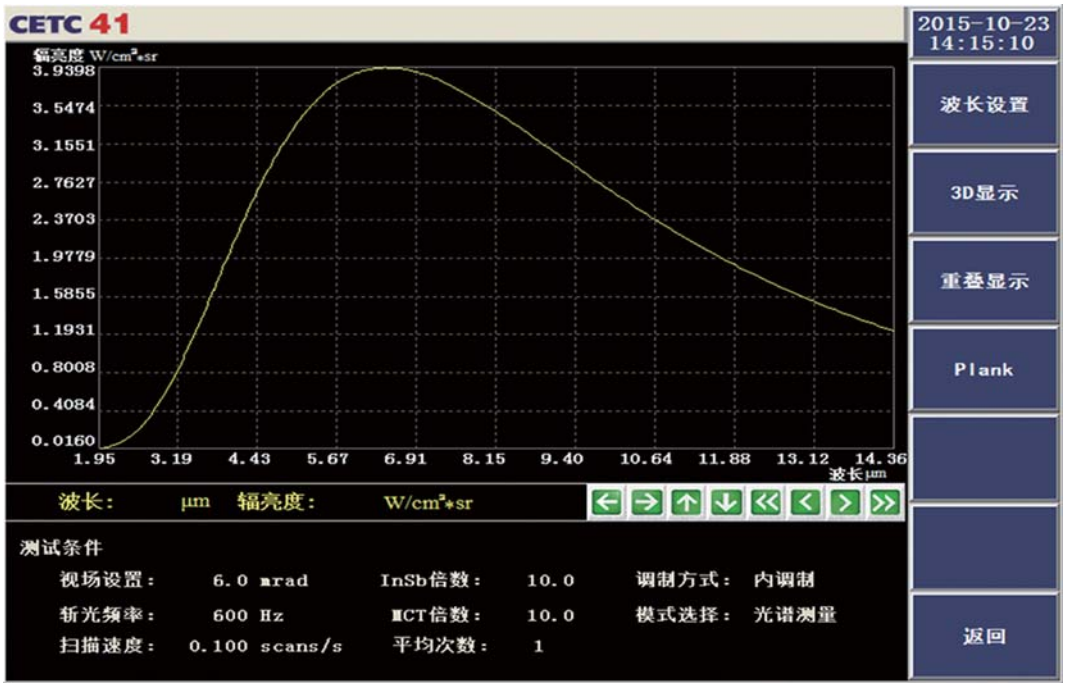


(b) 红外光谱辐射计的样机

图 1 红外光谱辐射计



(a) 整机软件框图

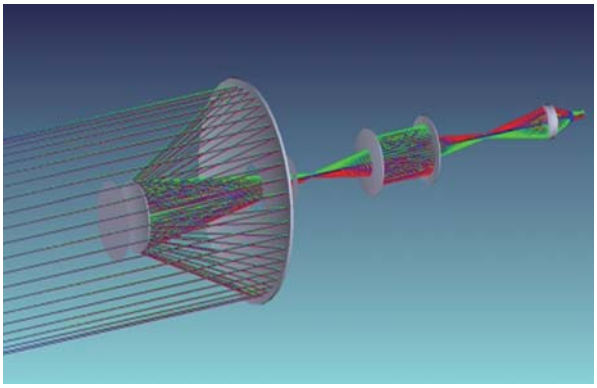


(b) 整机软件界面

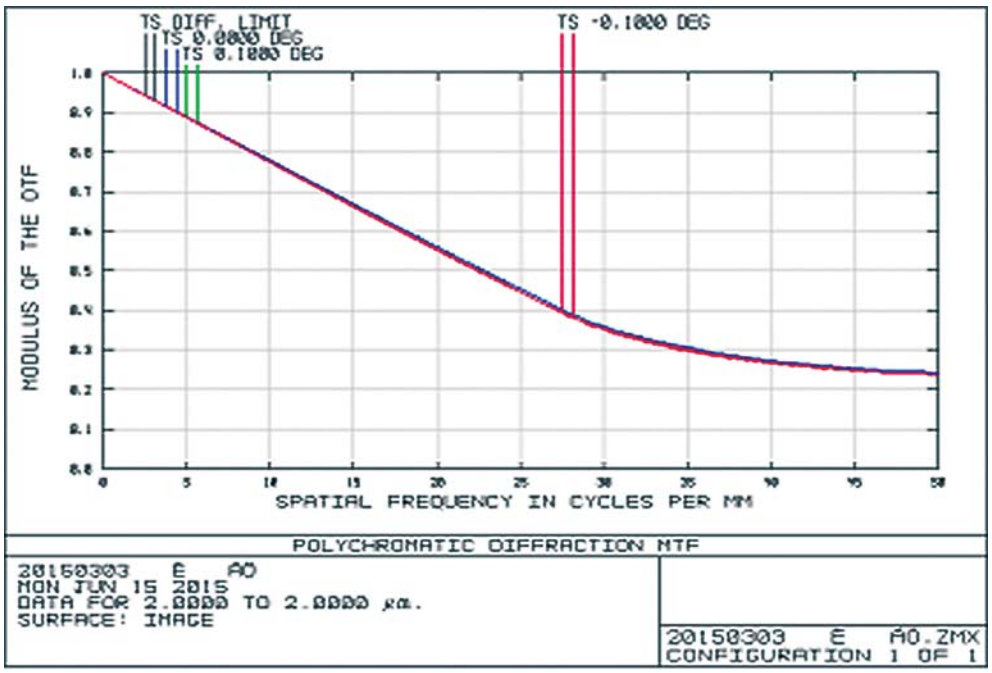
图 2 红外光谱辐射计整机

2 望远与观瞄系统

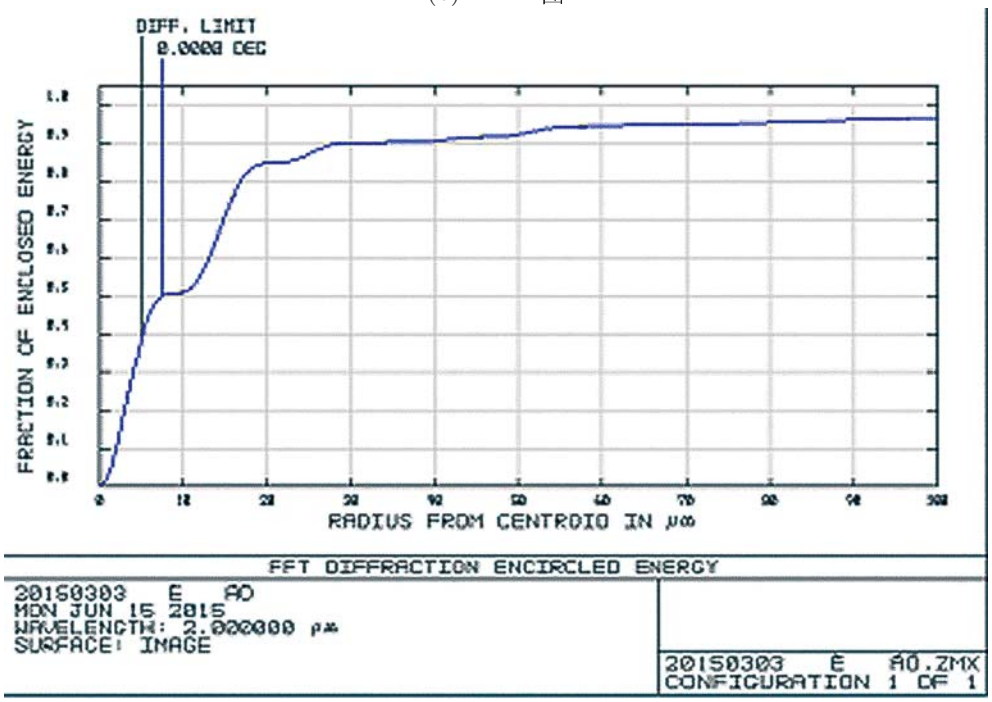
普通卡塞格林望远系统的主次镜分别由抛物面和双曲面组合而成。针对非球面镜存在加工难度大、成本高等问题，根据红外光谱辐射计的应用需求，对卡塞格林光学系统进行了改进。通过在光学系统最前面附加校正组，使得主次镜可由球面的面型实现，再与可变光阑配合后，能实现 0.3~6 mrad 的可变视场，如图 3 所示。观瞄系统用于观测目标的对焦，其采用同轴观瞄设计，以优化结构。



(a) 三维图



(b) MTF 图



(c) 能量集中度曲线图

图 3 红外光谱辐射计的光学系统设计与仿真图

3 光谱分光系统

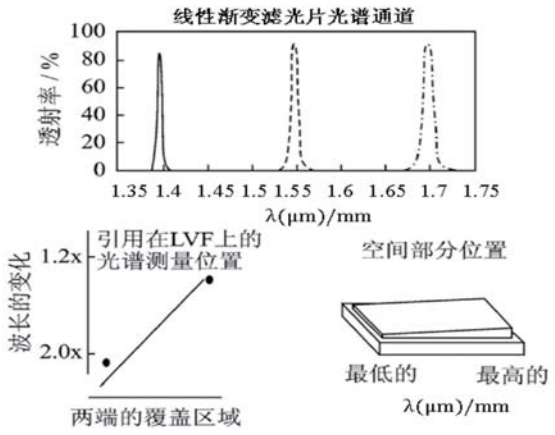
核心分光器件由渐变滤光片组成，它是一种基于光学干涉原理的新型超窄带滤光片，其工作原理如图 4(a) 所示。它的主要特点是透过波长沿某一方向均匀变化，使光谱通道的中心波长等光谱指标线性变化 [5]；入射辐射通过渐变滤波片时，非滤光片中心波长的辐射被滤除，从

而实现光谱分光。由于高次干涉条纹的限制，其最长透过波长不能超过最短透过波长的两倍。因此采用三片渐变滤光片拼接的方式与光谱融合算法能实现 2~14 μm 宽波段光谱覆盖。所用渐变滤光片的指标见表 2 。受工艺影响，每台产品所用渐变滤光片的指标略有差异。通过光谱融合算法，可有效消除渐变滤光片指标差异对整机性能指标的影响。

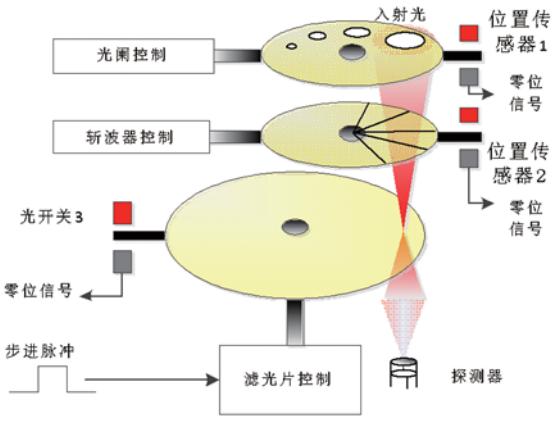
表 2　三片渐变滤光片的主要指标

光谱范围 (μm)	光谱分辨率	通道中心波长透过率
1.94~3.81	1.5%	85%
3.7~7.4	1.8%	65%
7.15~14.2	1.8%	70%

光谱分光系统包括斩光器、可变光阑、渐变滤光片以及对应的驱动电机等，如图 4(b) 所示。光阑通过控制入射光的视场角控制渐变滤光片上的光斑大小及入射的能量。斩波器用于完成入射光的调制。三片渐变滤光片分别安装在 120 度的扇形夹具内，形成圆形滤光片轮；在高精度细分步进电机的控制下，在位置传感器的配合下，精确控制渐变滤光片的透光位置及透光位置的连续切换，实现高精度的 2~14 μm 宽波段光谱分光，以满足光谱辐射测量的光谱分辨率要求。步进电机采用近似函数法控制算法和阶梯变频加速型运动律的控制方案 [6] ，实现高精度步进控制和不同光谱扫描速度的控制。



(a) 渐变滤光片的工作原理



(b) 光谱分光系统的结构框图

图 4　光谱分光系统

4 微弱红外光谱信号的检测与探测

4.1 双色探测器实现宽波段红外信号的探测

选用美国 JDSU 公司生产的 J15D16 双色探测器实现 2~14 μm 宽波段红外光谱信号的探测。该探测器采用液氮制冷，具备较高的探测率，主要性能参数见表 3 。

表 3　InSb/MCT 双色探测器的主要指标

指标	参数
响应波段	1~16.6 μm
光敏面积	2 mm×2 mm
峰值响应波长	13 μm
峰值波长探测率	1×10^{11} cmHz$^{1/2}$W^{-1}

4.2 用斩光和数字锁相放大方案实现微弱红外光谱信号的检测

采用渐变滤光片分光方式时，入射信号经光谱分光后，信号强度会降低。为实现红外光谱辐射计的高探测灵敏度，采用斩光和数字锁相放大方案，以增强微弱红外光谱信号的探测能力。

斩光器在直流电机的控制下，对入射光进行斩光。仪器采用数字鉴相反馈控制算法实现晶体稳定度的精密斩光，如图 5 所示，斩光稳定度优于 ±0.5 ‰ 。

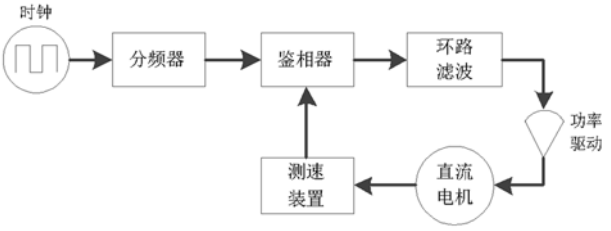
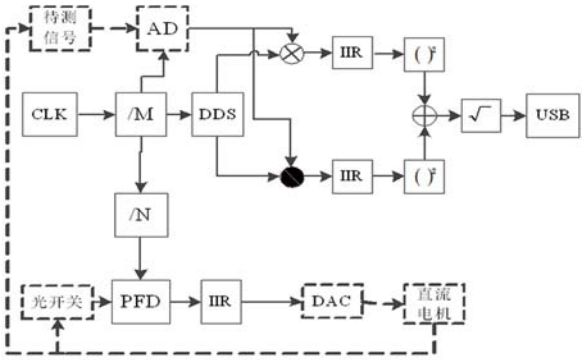
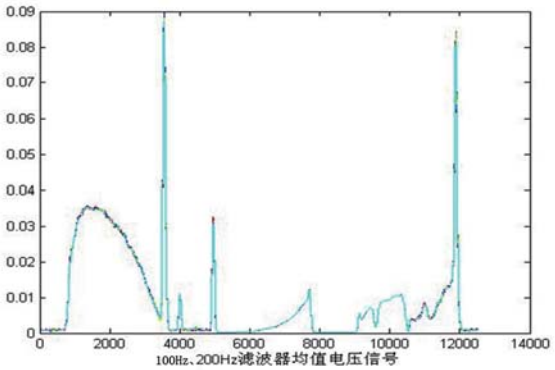


图 5 斩光器反馈控制原理框图

考虑到实际应用中，斩光信号和参考信号间存在相位差、频差等误差，所以采用数字正交双路锁相放大技术以降低误差影响，提高锁相放大的准确度。原理框图如图 6(a) 所示，图中包括调制信号通道、参考信号通道、锁相单元、低通滤波器等 [7] 。经锁相放大得到的红外光谱信号如图 6(b) 所示。



(a) 数字锁相放大的原理图



(b) 数字锁相放大输出的光谱信号

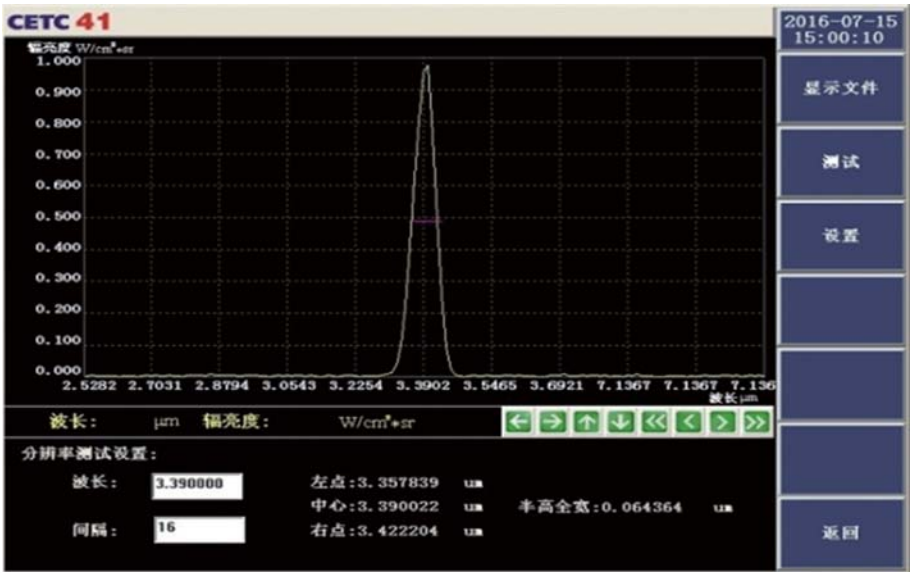
图 6 基于数字锁相放大的光谱信号探测

5 红外光谱辐射计的标定

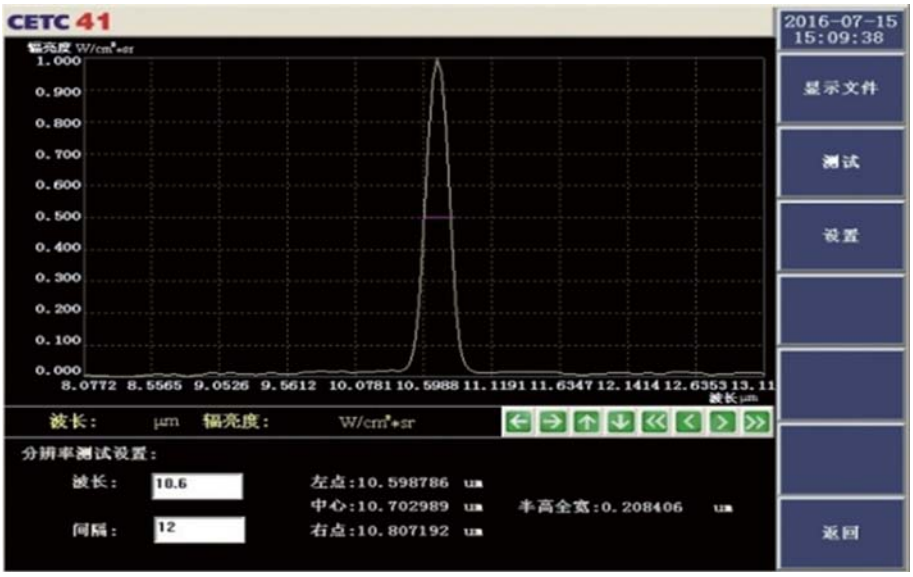
红外光谱辐射计的标定包括波长定标和辐射定标，可给出所测红外光谱的波长和辐射强度 [8] 。

5.1 波长定标

光谱辐射计的波长定标方案分两步。首先由理论推导，给出步进电机步进数与渐变滤光片透光位置的初始波长，并对渐变滤光片的非线性进行校正；然后利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定标精度。3.39 μm 、10.69 μm 激光器的校验结果如图 7 所示。结果表明，波长定标的精度优于 0.1% 。



(a) 3.39 μm 激光器的校验结果



(b)　10.69 μm 激光器的校验结果

图 7

5.2　辐射定标

选用中电 41 所研制的 AV6522 型黑体为辐射定标源，采用两点法辐射定标方案定标。辐射定标时，设置辐射定标参考基准的温度，使其与待测目标尽可能一致，以尽可能降低探测器的非线性问题对定标精度的影响。光谱辐射计的辐射定标流程是，首先进行背景测试，以确定仪器自身辐射及工作环境背景；再使用标准黑体作为定标参考，根据黑体辐射模型、光谱辐射计的输出电压信号、背景，确定光谱辐射计的辐射定标参数；然后使用辐射定标参数、背景，对目标观测数据进行辐射定标。辐射定标实验如图 8 所示。最后，利用研制的红外光谱辐射计测量了不同大气路径长度的大气透过率，如图 9 所示。



图 8　辐射定标实验

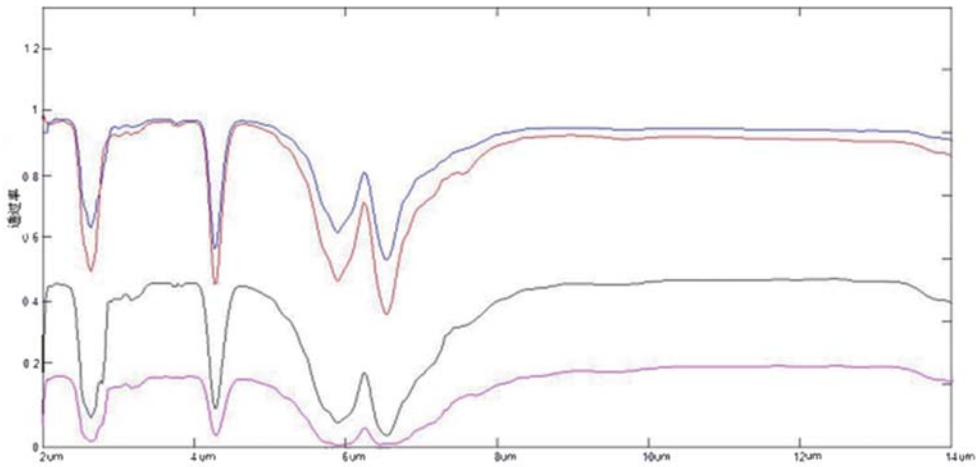


图 9　不同大气路径长度的大气透过率

6 总结

针对高分辨率宽波段快速红外光谱辐射测试的科研需求，研究了一种基于渐变滤光片的红外光谱辐测试技术。该技术可实现 2~14 μm 波段 2% 测量波长的光谱分辨率、 0.1 转 /s~10 转 /s 不同光谱测量速度的红外光谱辐射测量，在红外光谱辐射测试的相关领域具有较好的科研价值和应用前景。

参考文献

[1] Dario C, Amir G, Buckwald R A. New User Interface and Features of the SR 5000: Revival of Infrared CVF Based Spectroradiometry [C].*Proc. of SPIE*,2004,**5431**:46–56.

[2] Colwell R N. The Manual of Remote Sensing[M]. Second Edition,NewYork:The American Society of Photogrammetry, 1983: 324–326.

[3] Wolfe W L and Zissis G J. The Infrared Handbook[M].Washington DC:The Office of Naval Research, Dept. of the Navy,1978.

[4] 刘敬海，孙志勇，王茜，等．红外光谱辐射计的研制 [J].**红外与激光工程**, 1999, **2**(28):14–17.

[5] 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, **7**(34):72–75.

[6] Robinson D J. Analysis of Magnetic Stepping Motors[J]. *Industrial Electronics & Control Instrument*, 1999, **16**(2):1228–1242.

[7] Alonso R, Villuendas F, Borja J, et al.Dual-wavelength Measurement System for Absorbance Chemical Sensing [J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, **2**(14):551–557.

[8] Ye Z, Wan Z. Spectral Calibration of Large-diameter Infrared Radiometer[J].*Spectroscopy and Spectral Analysis*,2012,**32**(7):1194–1198.

(上接第 14 页)

6 结束语

本文针对 4 个波段 (弱 CO_2 、CH_4 、强 CO_2 以及 O_2) 分别设计了 4 种地面刈幅宽度为 500 km 、空间分辨率为 2 km 的平面光栅光谱仪系统。其光谱分辨率分别为 0.08 nm/20000 (弱 CO_2) 、0.08 nm/20000 (CH_4) 、0.1032 nm/20000 (强 CO_2) 和 0.045 nm/17000 (O_2) 。具体介绍了参数设定与导出，并给出了部分计算过程。阐述了采用 SiO_2 浸没式衍射光栅与利特罗式光学结构的设计方案，给出了优化结果的一部分核心参数。结果表明，有近乎 90% 的能量集中在一个像元内；各个波长的 MTF 曲线不低于 80% ， O_2 波段不低于 70% ，满足成像质量要求。

参考文献

[1] 郑玉权．温室气体遥感探测仪器发展现状 [J]. **中国光学**, 2011, **4**(6): 546–561.

[2] Manfred W W, Stefan N, Jochen Skupin, et al. SCIAMACHY on ENVISAT: Instrument Monitoring and Calibration Two Years after Launch [C]. *SPIE*, 2004, **5570**: 391–400.

[3] Robert H, Randy P, Brian S, et al. Current Development Status of the Orbiting Carbon Observatory Instrument Optical Design [C]. *SPIE*, 2005, **5883**: 1–10.

[4] Robert H, Randy P, Brian S, et al. The Orbiting Carbon Observatory (OCO) Instrument Optical Design [C]. *SPIE*, 2004, **5523**: 51–62.

[5] David C, Chip M, Karen Y. The Orbiting Carbon Observatory (OCO): Watching the Earth Breathe - Mapping Carbon Dioxide from Space [J]. *The Earth Observer*, 2008, **20**: 8–11.

[6] Armin L. Report for Mission Selection: CarbonSat [R]. Noordwijk: European Space Agency, 2015.

[7] 朱学谦，钮新华，丁雷．一种宽幅高分辨率 CO_2 探测仪光学系统设计 [J]. **科学技术与工程**, 2016, **16**(13): 96–100.

[8] Lee D, Allington-Smith J R. An Experimental Investigation of Immersed Gratings [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2000, **312**(1): 57–69.

[9] 郑玉权，高志良．CO_2 探测仪光学系统设计 [J]. **光学 · 精密工程**, 2012, **20**(12): 2651–2652.