

空间大口径红外相机整机光谱响应测试方法研究

陆 强^{1,2}, 孙小进^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 对空间大口径红外相机整机光谱响应测试方法进行介绍, 建立空间大口径红外相机整机光谱响应测试系统。该测试系统包括: 可见及红外光源、单色仪、标准探测器、数据采集系统、平行光管、真空罐、二维转台及待测相机。待测相机的波段集中在 H₂O、CO₂ 等吸收波段, 为了消除大气吸收波段对待测相机的影响, 需要将平行光管、待测相机、转台等置于真空条件下, 并向单色仪中通入氮气稳定后进行测试。整机试验结果表明, 通入氮气后光谱测试精度大大提高, 大气吸收波段光谱可准确测试。

关键词: 光谱响应测试; 单色仪; 大气吸收; 氮气

中图分类号: TN215; TN29; O433.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0323002

Research of spectral response measurement of space infrared camera with large aperture

Lu Qiang^{1,2}, Sun Xiaojin^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The spectral response measurement of space infrared camera with large aperture was introduced. The measure system had been developed, which included visible and infrared light source, monochromator, standard detectors, data acquisition system, parallel light tube, vacuum tank, turntable and the test camera. The bands of test camera were concentrated in water vapor, CO₂ absorption bands. In order to eliminate the impact of atmospheric absorption bands, parallel light tubes, test camera, turntable should be placed under vacuum condition, and the monochromator should be purged with nitrogen. The results show that, after purged with nitrogen, the spectrum precision is greatly improved and the spectrum at atmospheric absorption bands can be accurately measured.

Key words: spectral responsivity test; monochromator; atmospheric absorption bands; nitrogen

收稿日期: 2015-07-21; 修订日期: 2015-08-19

作者简介: 陆强(1985-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事光学设计、光学装校及光学测试方面的研究。Email: luqiangac@126.com

0 引言

整机光谱响应测量主要用于测量仪器的某个波段的光谱响应曲线,判断光谱响应曲线是否满足用户要求,并在将实际光谱响应曲线用于数据反演和目标判别。系统光谱响应特征是光电仪器最重要的特性之一,综合反映仪器的探测能力^[1-6]。

系统的相对光谱响应有两种方法获得,累乘法 and 实测法。累乘法指按照波长将系统中信号光经过的各光学零件(含反射镜、透镜、窗口)和探测器的光谱响应逐个相乘,然后归一化得到系统的相对光谱响应。它的优点是理论性强,算法简便。但无论是反射镜还是透镜,计算时输入的数据都是正入射时的数据。这种方法未考虑全口径实际情况下,由于入射角度不同,带来不同波长在实际透过率和实际反射率上的差异,也未考虑光学系统偏振、杂散等因素的实际影响。而实测系统的光谱响应恰恰能弥补这个不足,得到光谱响应的真实值。目前国外很多卫星相对光谱响应均是实测值。如美国航天航空局 EO-1

卫星的 ALI^[7]和 Hyperion^[8]两个载荷以及美军的超光谱成像仪 COMPASS^[9],均是先将宽带光源引入单色仪进行准直后进入待测相机后进行实测。

目前国内大多采用累乘法计算整机的光谱响应,如“风云二号”多通道辐射计,它的光学口径为 $\phi 400\text{ mm}$ 。对于口径大于 $\phi 400\text{ mm}$ 的大口径红外相机,且工作谱段含大气吸收谱段的整机,目前国内还未见光谱响应测试的报道。因此针对空间大口径红外相机整机光谱响应测试方法进行研究具有一定的现实意义。

1 测试系统组成及原理

1.1 测试系统组成

该光谱响应测试系统主要包括:单色仪、可见及红外光源、标准探测器、数据采集系统、平行光管、真空罐、二维转台(如图 1 所示)。

(1) 单色仪:选用单色仪的 $F/\#$ 需与平行光管的 $F/\#$ 相匹配,为了得到从 $0.35\sim 6\ \mu\text{m}$ 的光谱需选用 $1\ 200\ \text{gr/mm}$ 、 $600\ \text{gr/mm}$ 和 $150\ \text{gr/mm}$ 的光栅。为了

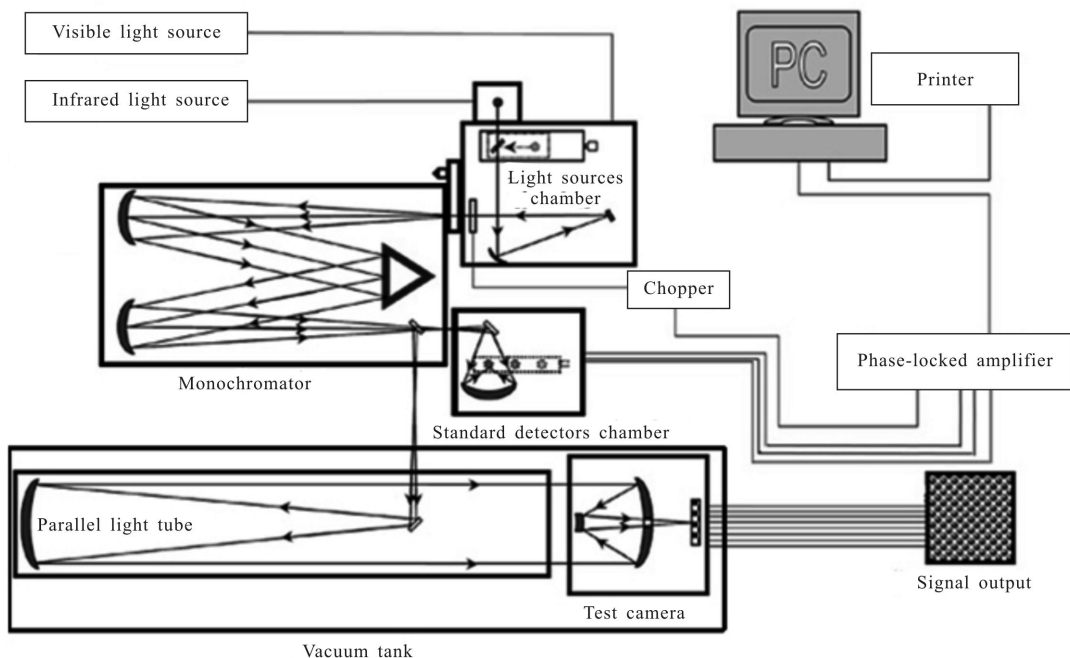


图 1 光谱响应测试原理图

Fig.1 Schematic diagram of spectral response measurement

消除光栅的多级衍射,需配置滤光片轮(如图 2 所示,其具体参数见表 1)。

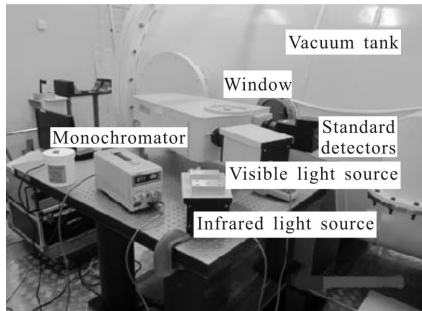


图 2 单色仪布局示意图

Fig.2 Layout of monochromator

表 1 单色仪参数

Tab.1 Parameters of monochromator

Parameters	Requirement
Focus	750 mm
<i>F</i> /#	<i>F</i> /9.7
Resolution	0.03 nm
Reciprocal linear dispersion	1.1 μm(1 200 gr/mm)
Wavelength accuracy	0.2 nm
Wavelength repeatability	0.1 nm
Slit width	0.01–3 mm continuous adjustable
Filter wheel	7 gears
Gratings	1 200 gr/mm wavelength range 0.35–1.2 μm
	600 gr/mm wavelength range 1–2.4 μm
	150 gr/mm wavelength range 2–6 μm

(2) 光源:包括可见波段的溴钨灯光源和红外波段的氮化硅光源(具体参数见表 2 和表 3)。

表 2 溴钨灯光源参数

Tab.2 Parameters of bromine tungsten lamp light source

Parameters	Requirement
Electric power	150 W
Spectral range	300–2 500 nm
Output current	5.5–6.4 A adjustable

表 3 氮化硅光源参数

Tab.3 Parameters of silicon nitride light source

Parameters	Requirement
Rated current	5.83 A
Spectral range	1–14 μm
Working temperature	900–1 200 °C

(3) 标准探测器:可见区、近红外区、红外区分别对应的探测器如表 4 所示。

表 4 标准探测器

Tab.4 Standard detectors

Spectral band	Standard detector
0.4–1.1 μm	Standard silicon detector (0.2–1.1 μm)
1.1–1.7 μm	Standard InGaAs detector (0.8–1.7 μm)
1.7–6 μm	Standard pyroelectric detector (1–14 μm)

(4) 数据采集系统:是一套光谱系统数据采集、数据分析全集成软件系统。具有任意波长定位功能、滤光片自动选择功能、光谱扫描功能、数据采集及处理功能。其中光谱扫描功能可设定方案自动扫描;扫描过程中可自动切换光栅。数据采集及处理功能可设定采样积分次数、工频抑制、双信道数据采集。

(5) 平行光管:口径和 *F*/# 需和待测相机及单色仪匹配,工作在真空常温环境下(20±5 °C)。

(6) 真空罐:真空度要求优于 1.33×10⁻³ Pa。

(7) 二维转台:工作在温度控制柜内,真空环境。

1.2 测试原理

试验前,先调整二维转台,将平行光管和待测相机的光轴对准,将光源安装在单色仪光源室处,单色仪出射狭缝对准平行光管焦面。可见或红外光从入射狭缝进入单色仪后通过光栅分光得到单色光,一部分进入标准探测器,另一部分进入平行光管,到达待测相机的探测器焦面。待测相机直接获取单色仪出射狭缝的光谱数据,通过处理数据,获得整机光谱相应曲线。

影响相机光谱特性的主要因素有各反射镜反射率、各透镜的透射率和反射率、杜瓦窗口透射率、滤光片透射率和探测器光谱响应率。

根据待测相机的技术状态可知,相机光谱曲线的中心位置和半高宽,取决于滤光片光谱曲线和探测器响应曲线,而且,工作温度是影响光谱偏移的主要因素。因此,要求光谱测试试验过程中,滤光片和探测器工作在特定工作温度,相机其他组部件工作在常温温度点(20±5 °C)。

测试过程如下:

(1) 真空罐真空度优于 1.33e-3 Pa,将单色仪出

射狭缝对准平行光管焦面,完成单色仪和平行光管的对接。

(2) 单色仪出射光路对准标准探测器,利用标准探测器测得 0.35~6 μm 的光源和单色仪的光谱响应曲线,采样间隔 5 nm。记录标准探测器在各个采样点的成像数据。

(3) 单色仪出射光路对准平行光管,将光栅波长切换到 0.35 μm 后,发送 TTL 信号给待测相机,通知相机开始采集。此后每隔 5 s,光栅移动 5 nm,移动好后,发送 TTL 信号给相机通知采集,如此反复,至此测试结束。记录相机探测器在各个采样点的成像数据。

光谱数据处理时,需根据各个采样点的光谱相应数据,并保证同一谱段下的数据相除,计算得到相机的光谱响应数据:

$$E(\lambda) = \frac{E_1(\lambda)}{\frac{E_2(\lambda)}{E_3(\lambda)} \cdot E_4(\lambda) \cdot E_5(\lambda)} = \frac{E_1(\lambda) \cdot E_3(\lambda)}{E_2(\lambda) \cdot E_4(\lambda) \cdot E_5(\lambda)} \quad (1)$$

式中: $E_1(\lambda)$ 为待测相机接收到单色仪光源输出的某一谱段的相应值; $E_2(\lambda)$ 为标准探测器接收到单色仪光源输出相应谱段的数据; $E_3(\lambda)$ 为标准探测器的相应谱段自身响应; $E_4(\lambda)$ 为平行光管各个反射镜的相应谱段反射率乘积; $E_5(\lambda)$ 为平行光管窗口的相应谱段透过率,最终可描绘出关心波段的光谱相应曲线。

2 单色仪的指标标定

测试前,需要对单色仪出射波长的准确度、重复性以及分辨率进行测试。测试方法如下:

(1) 波长准确度和重复性

单色入/出射狭缝均开 15 μm,用汞灯均匀照明入射狭缝,在出射狭缝处放置光电倍增管,连接数据采集系统,启动微机扫描系统,进行波长扫描,扫描步距 0.02 nm(1 200 gr/mm 光栅,闪耀波长为 500 nm),测量波长峰值(见表 5),以单方向读出各谱线的波峰

表 5 准确度和重复性使用波长(单位:nm)

Tab.5 Used wavelength of accuracy and repeatability test(Unit:nm)

Blazed wavelength	1	2	3	4	5
500	365.02	435.83	579.07	730.04	871.66

所对应的波长读数,并重复三次,每次测得的值与理论波长值相减并取绝对值,其最大者为波长准确度。三次所测的最大值和最小值之差为波长重复性。

(2) 分辨率

仪器的出/入狭缝高度为 2 mm,出/入狭缝宽度为 10 μm,用汞灯作光源,均匀照明入射狭缝,在出射狭缝处放置光电倍增管,连接数据采集系统,波长扫描范围 435~436.6 nm,扫描步距 0.02 nm (1 200 gr/mm 光栅),扫描得到 435.8 nm 处的谱线轮廓,测量其前后两个半高度处的波长差为分辨率。

(3) 重复性

整体全光谱做一次扫描,归一化后,得到一张谱图。重复九次,最终得到九张谱图。任选 6 个波段,每个波段下共有 9 个点,记为: $R_{\lambda_0}(i), i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ 。

算出这 9 组数据的平均值:

$$\bar{R} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 R_{\lambda_0}(i)$$

将这 9 组数据和该平均值进行比较,找出 9 组数据中和平均值相差最大的一组数据,该数据和平均值最大偏差需在 ±5% 以内。

3 大气吸收光谱的处理

光波在大气中传播时,某些波长的能量会被大气中气体成分吸收^[10-11]。组成大气的主要成分是 N_2 、 O_2 、Ar,由于它们是对称分子,振动时不吸收 15 μm 以下的红外波。在 0.4~6 μm 内大气吸收作用比较显著的气体成分是 H_2O 和 CO_2 ,如图 3 和图 4 所示。

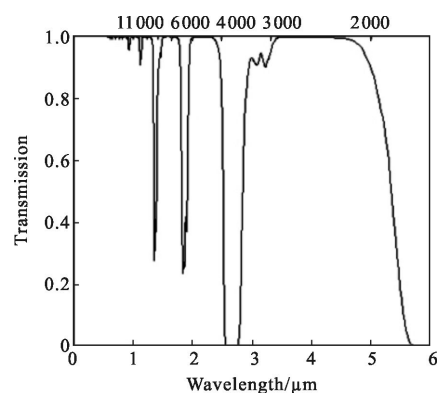


图 3 地面 H_2O 透过率曲线

Fig.3 Transmission of H_2O on ground

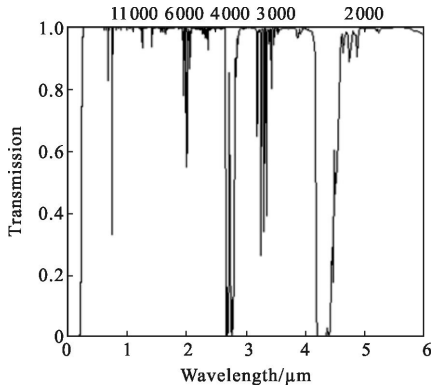


图 4 地面 CO₂ 透过率曲线

Fig.4 Transmission of CO₂ on ground

从 H₂O 和 CO₂ 透过率曲线看出,在 2.7 μm 和 6 μm 附近,有 H₂O 的强吸收带;在 2.7 μm、4.3 μm 附近有 CO₂ 的强吸收带;2~2.6 μm,3~5 μm 是两个对遥感探测和大气辐射十分重要的大气窗区。

由于待测相机的波段集中在 H₂O、CO₂ 等吸收波段,为了消除大气吸收的影响,进行光谱响应函数的测量时,需要将平行光管、待测相机、转台等置于真空条件下,并将单色仪中通入氮气稳定后进行测试。真空罐焦面上的光学窗口可以透过不同波长(可见光与红外波段)的光源,实现多个波段测量。

图 5 为单色仪中未通入氮气时,热释电标准探测器测得氮化硅光源加单色仪 2~6 μm 范围内的整体光谱曲线,单色仪入射狭缝 3 mm,出射狭缝 3 mm。由图可见,2.7 μm 和 4.25 μm 处存在较大的波谷,4.25 μm 处输出强度接近 0。

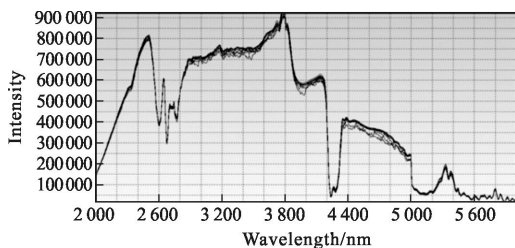


图 5 2~6 μm 光谱曲线

Fig.5 Spectral curves at 2~6 μm

将已知波段的中短波窄带滤光片安装于标准探测器前,得到标准探测器的光谱响应曲线。由于 4.25 μm 处单色仪输出强度接近 0,无法得到准确的标准探测器的光谱响应曲线。

在单色仪氮气预留孔中通入氮气,20 min 后进行测试,如图 6、图 7 所示。

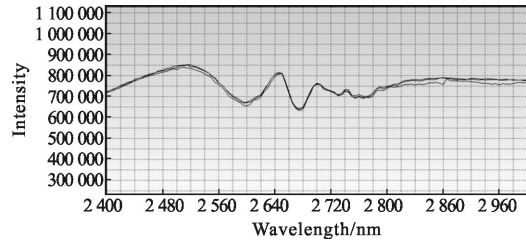


图 6 2.4~3.0 μm 通氮气整体光谱曲线

Fig.6 Spectral curves at 2.4~3.0 μm when purged with nitrogen

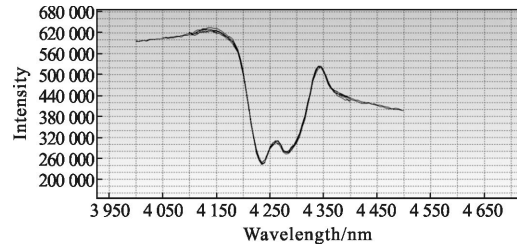


图 7 4.0~4.5 μm 通氮气整体光谱曲线

Fig.7 Spectral curves at 4.0~4.5 μm when purged with nitrogen

从图 6 和图 7 可以看出,通入氮气后在 2.7 μm 和 4.25 μm 处的光源和单色仪整体光谱曲线有明显提高。2.7 μm 处单色仪输出强度提高约 2 倍,4.25 μm 处单色仪输出强度提高约 5 倍。

将已知谱段的中短波窄带滤光片安装于标准探测器前,通入氮气稳定后,得到标准探测器的光谱响应曲线。该曲线中心波长与已知谱段的中短波窄带滤光片中心波长相比,误差小于 5 nm,满足使用要求。因此通入氮气后,随着单色仪输出强度的提高,光谱测试精度相应提高,大气吸收波段光谱可准确测试。

4 整机测试结果及误差分析

利用文中的光谱响应测试方案对某空间大口径红外相机进行了整机光谱响应测试。将相机探测器的光谱响应按 1.2 节中公式(1)处理后得到图 8 和图 9,分别为经归一化后的可见通道和红外通道的整机光谱响应测试曲线。

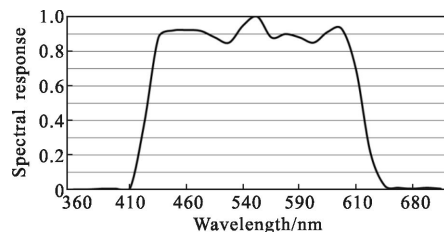


图 8 可见通道整机光谱响应曲线

Fig.8 Spectral curve of visible band

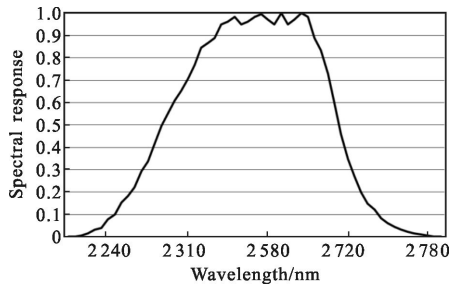


图 9 红外通道整机光谱响应曲线

Fig.9 Spectral curve of infrared band

该整机光谱响应测试方案的误差来源主要有：

(1) 单色仪自身的波长准确性和波长重复性。利用第 2 节中的测试方法,测得波长准确度优于 0.2 nm, 波长重复性优于 0.1 nm。

(2) 大气吸收波段光谱的测试。利用第 3 节中通氮气的方法,红外波段光谱误差小于 5 nm。

(3) 电子学噪声。试验过程中,进行了多次采集取平均的方法来降低待测相机电子学采集噪声,数据采集产生的误差约为 1%。

5 结 论

介绍了空间大口径红外相机整机光谱响应测试方案、指标标定、测试步骤及测试结果。为了消除大气吸收波段对待测相机的影响,需将平行光管、待测相机、转台等置于真空条件下,并向单色仪中通入氮气,对应谱段的能量得到提高,光谱测试精度相应得到提高,大气吸收波段光谱可准确测试。

参 考 文 献：

[1] Hu Xiuqing, Sun Ling, Liu Jingjing, et al. Calibration for the solar reflective bands of medium resolution spectral imager onboard FY-3A[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2013, 3(4): 71-83. (in Chinese)
胡秀清, 孙凌, 刘京晶, 等. 风云三号 A 星中分辨率光谱成像仪反射太阳波段辐射定标[J]. 气象科技进展, 2013, 3(4): 71-83.

[2] Gao Hailiang, Gu Xingfa, Yu Tao, et al. HJ1A/HIS radiometric calibration and spectrum response function sensitivity analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(11): 3149-3155. (in Chinese)
高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 环境卫星 HJ1A 超光谱成像仪在轨辐射定标及光谱响应函数敏感性分析 [J]. 光谱学与

光谱分析, 2010, 30(11): 3149-3155.

[3] Xu Na, Hu Xiuqing, Chen Lin, et al. On-orbit radiometric calibration accuracy of FY-3A MERSI thermal infrared channel [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(12): 3429-3434. (in Chinese)
徐娜, 胡秀清, 陈林, 等. FY-3A MERSI 热红外通道在轨辐射定标精度评估 [J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(12): 3429-3434.

[4] Zhang Jianmin, Lin Yandong, Shao Jing, et al. A standard facility for spectral response measurement of silicon photodiodes[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1998, 19(3): 194-198. (in Chinese)
张建民, 林延东, 邵晶, 等. 硅光电探测器光谱响应度测量标准装置[J]. 计量学报, 1998, 19(3): 194-198.

[5] Zhang Hui, Liu Jianwei, Yang Liang, et al. Study and development of spectral responsibility testing system for ultraviolet -visible detector [J]. *Laser & Infrared*, 2003, 33(5): 371-373. (in Chinese)
张辉, 刘建伟, 杨良, 等. 紫外及可见光探测器光谱响应测试系统的研制[J]. 激光与红外, 2003, 33(5): 371-373.

[6] Joseph P Rice, Keith R Lykke, Howard W Yoon. A method for testing the spectral responsivity of infrared cameras using tunable lasers[C]//SPIE, 2003, 5076: 112-122.

[7] Jeffrey G A, Alexander P C. Spectral calibration of the EO-1 advanced land imager[C]//SPIE, 1999, 3750: 109-116.

[8] Liao L, Jarecke P, Gleichauf D, et al. Performance characterization of the hyperion imaging spectrometer instrument[C]//SPIE, 2004, 4135: 264-275.

[9] Zadnik J, Guerin D, Moss R, et al. Calibration procedures and measurements for the COMPASS hyperspectral imager [C]//SPIE, 2004, 5425: 182-188.

[10] Wei Heli, Dai Congming. Research of atmospheric transfer correction in radiance measurement: atmospheric radiative transfer model and the analysis of key atmospheric parameters[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 884-890. (in Chinese)
魏合理, 戴聪明. 辐射特性测量大气传输修正研究: 大气辐射传输模式和关键大气参数分析 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 884-890.

[11] Chen Xiuhong, Wei Heli, Xu Qingshan. Infrared atmospheric transmittance calculation model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 811-816. (in Chinese)
陈秀红, 魏合理, 徐青山. 红外大气透过率的计算模式[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 811-816.