

飞机红外光谱辐射特性的多光谱测量

肖喜中^{1,2} 王跃明¹ 马 骏^{1,2} 王建宇¹

(¹中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)
²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 飞机机体及其羽流的红外光谱辐射特性,可以为探测、跟踪系统的谱段选择提供依据。准确的光谱辐射特性有利于提高系统探测和跟踪的能力。对飞机的红外辐射光谱特性进行了外场测量研究。建立和分析了辐射传输模型,设计了一个多谱段、滤光片分光的中波红外多光谱成像仪,采用了640 pixel×512 pixel的中波面阵探测器,响应波长范围覆盖3.7~4.8 μm,并对其噪声性能进行了评估。实际选取了民航飞机进行实验测量,获取了机体及羽流在4个谱段上的光谱辐射特性。与传统的方法相比,获得了更真实的飞机红外辐射光谱特性。

关键词 光谱学;中波红外;辐射传输;多光谱成像;光谱特性

中图分类号 TN21 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1030002

Multispectral Measurements of Infrared Spectral Characteristics of an Aircraft

Xiao Xizhong^{1,2} Wang Yueming¹ Ma Jun^{1,2} Wang Jianyu¹

(¹Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)
²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The spectral characteristics of infrared radiation from aircraft body and its plume provide a basis for band selection to detect and track the aircraft. Accurate spectral characteristics improve the performances of detection and tracking. Field multispectral measurements of the characteristics are introduced. A radiation transfer model which helps to measure the aircraft plume is proposed and analyzed. Furthermore, a multispectral imager with spectroscopic filters is designed. It uses a mid-infrared detector, of which the dimension is 640 pixel×512 pixel, and the spectral response covers 3.7~4.8 μm. The noise performance of the imager is also evaluated. A civil aeroplane is selected for the measurements. Under the transfer model, the radiances of the aircraft, both the body and the plume, are obtained in 4 spectral bands. Compared to the conventional method, more accurate infrared spectral characteristics of aircraft are acquired.

Key words spectroscopy; mid-infrared; radiation transfer; multispectral imaging; spectral characteristics

OCIS codes 300.6340; 040.3060; 040.5350; 110.4234; 350.5610

1 引 言

飞机的红外光谱辐射特性是指其红外辐射随光谱的分布特性,主要来源包括对太阳光的反射和散射,对地表辐射的反射和散射,以及机体、羽流的自

身辐射。飞机的红外光谱辐射特性揭示了其自身的某些固有属性^[1],为探测、跟踪系统的谱段选择提供了重要的依据,准确的光谱特性能有效提高这些系统的性能。近年来,目标监测技术领域对飞机红外

收稿日期: 2014-05-26; **收到修改稿日期**: 2014-06-15

基金项目: 高分专项民用航空项目(30-H33D01-9006-13/15)

作者简介: 肖喜中(1988—),男,博士研究生,主要从事中波红外光谱成像方面的研究。

E-mail: xiaoxizhong2009@163.com

导师简介: 王建宇(1959—),男,博士,研究员,主要从事光学遥感、信息获取与处理技术方面的研究。

E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

光谱辐射特性研究及其准确性已提出了越来越紧迫的需求。

目前,国内开展的研究主要有两种,一种是建立飞机机体、羽流的三维模型,利用反向蒙特卡罗法,或者有限体积积分法对飞机在各个谱段上的辐射特性进行求解和仿真^[2-4],该方法的优点是耗费少,能快速获得飞机在各个状态下的光谱辐射特性,但是缺乏真实数据进行校核;另一种是利用光谱仪,近距离对处于地面测试中的飞机发动机羽流进行测量,以获取其辐射特性曲线^[5],这种方法的优点是能得到真实的光谱辐射特性,但仅限于地面测试状态,没能对实际飞行状态中的羽流光谱辐射特性进行测量。此外,机体的红外辐射并不在这种方法的研究范畴内。实际上,第二种方法更多的则是基于比尔朗伯定律,应用在气体成分的非接触式检测等领域内^[6-10]。

本文对飞机的红外辐射在中波红外 3.7~4.8 μm 谱段上的光谱特性进行了外场获取研究:提出和分析了飞机机体、羽流的辐射传输模型,并设计实现了一个 4 谱段、滤光片分光的中波红外多光谱成像仪。采用了 640 pixel×512 pixel 的大面阵探测器,响应波长范围覆盖 3.7~4.8 μm。选取民航飞机进行了实际的实验测量,获取得到了机体及羽流在 4 个谱段上的辐射特性。

2 辐射传输模型

飞机的红外辐射包括机体对太阳光、地表辐射

的反射和散射,以及机体、羽流的自身辐射,能够反映其自身的固有辐射特点。经过一定距离的大气路径传输后,进入光谱仪。因此,研究红外辐射的整个大气传输过程,可以为收集这些固有的光谱特性提供重要基础。

一个典型的研究场景如图 1 所示,利用光谱仪,从地面对一定距离外、处于一定高度的飞机进行持续的联动观测,使得飞机的机体、羽流落在光谱仪的视场之内。在这个场景之下,光谱辐射特性按来源可分为两个部分:1)羽流的辐射;2)机体自身辐射以及对外部辐射的反射。现分别对这两个来源的光谱辐射的传输过程进行建模。

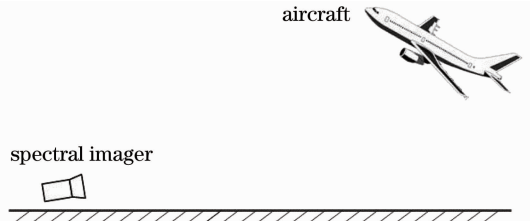


图 1 典型的观测场景示意图

Fig. 1 Schematic of typical measurement scenario

首先是飞机羽流的红外光谱辐射的传输。如图 2 所示,远端大气的路径光谱辐亮度 $L_{E1}(\lambda)$,被飞机羽流吸收一部分,剩余光谱辐亮度为 $L_{T2}(\lambda)$ 。此外,羽流自身还有一定的光谱辐亮度 $L_{E2}(\lambda)$ 。 $L_{E2}(\lambda)$ 和 $L_{T2}(\lambda)$ 两部分继续往成像仪的入瞳传输,又经过了近端大气的吸收,剩余为 $L_{T3}(\lambda)$,而近端大气自身亦存在光谱辐亮度 $L_{E3}(\lambda)$ 。

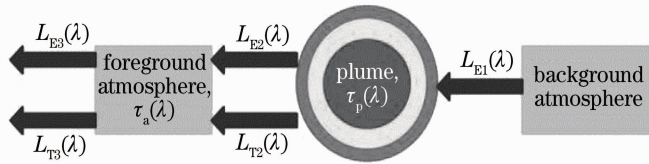


图 2 辐射传输原理图

Fig. 2 Radiation transfer diagram

假设近端大气和羽流的光谱透射率分别为 $\tau_a(\lambda)$ 和 $\tau_p(\lambda)$,则多谱段成像仪接收到的光谱辐亮度为

$$L(\lambda) = L_{E3}(\lambda) + \tau_a(\lambda)L_{E2}(\lambda) + \tau_a(\lambda)\tau_p(\lambda)L_{E1}(\lambda), \quad (1)$$

式中近端大气光谱透射率 $\tau_a(\lambda)$ 和羽流的光谱透射率 $\tau_p(\lambda)$ 均小于 1。而对于长距离上的低空大气,通常可以被认为是光学厚,这意味着

$$L_{E3}(\lambda) \approx L_{E3}(\lambda) + \tau_a(\lambda)L_{E1}(\lambda), \quad (2)$$

(2)式表明,远端大气产生的光谱辐亮度可以忽略不计,将(2)式代入(1)式中,化简为

$$L(\lambda) = L_{E3}(\lambda) + \tau_a(\lambda)L_{E2}(\lambda), \quad (3)$$

(3)式表明,在图 2 所示的辐射模型中,光谱仪接收到的辐亮度为近端大气的自身辐亮度与经由近端大气传输衰减后的羽流辐亮度之和,这与刘莹奇等^[11]建立的空间目标红外特性测量原理相似。

现将(3)式再改写成光子辐射通量的形式^[12],令光学系统的效率为 τ_0 ,且 $F\#$ 数(F -number)是

F , 而探测器的像元面积是 A_d , 填充因子是 F_F , 量子效率是 Q_E , 电荷增益为 G , 探测器响应得到一定的电压增量 ΔV . 实际测试时, 若采用的积分时间是 T_{int} , 结合该谱段 λ 上单个光子的能量 $E_s(\lambda)$, 可以得到输出电压增量和入瞳处辐亮度之间的关系为

$$\Delta V = \frac{L(\lambda) - L_{E3}(\lambda)}{E_s(\lambda)} \cdot \frac{\pi A_d}{4F^2} \cdot \tau_0 \cdot F_F \cdot Q_E \cdot T_{int} \cdot G, \quad (4)$$

式中 $E_s(\lambda) = hc/\lambda$, h 表示普朗克常数, c 表示光速. 在此基础上, 将(4)式代入(3)式进行变换, 最终得到羽流辐亮度与探测器输出电压增量的关系为

$$L_{E2}(\lambda) = \frac{\Delta V \cdot h \cdot c}{\lambda} \cdot \frac{4 \cdot F^2}{\pi \cdot A_d} \cdot \frac{1}{\tau_a(\lambda) \cdot \tau_0 \cdot F_F \cdot Q_E \cdot T_{int} \cdot G}. \quad (5)$$

对于机体总的红外光谱辐射传输模型而言, 与图 2 中的模型略微不同: 机体本身对红外辐射是不透的, 光谱仪视场实际接收到的辐亮度是近端大气的自身辐亮度与经过近端大气传输衰减后的机体辐亮度之和. 因此, 机体的辐亮度与探测器输出电压增量的关系式仍然可以沿用(5)式.

3 中波红外多光谱成像系统

水汽以及 CO_2 在中波红外谱段上存在有强烈的吸收带, 位于吸收带内的辐射又被强烈衰减, 通常的研究绝大多数是大气窗口范围内展开的. 但水汽和 CO_2 在中波红外谱段上又是一个强发射带, 对飞机这一类目标而言, 发动机排放的高温水汽和 CO_2 的辐射非常强, 对其光谱辐射特性的研究有很大的必要性.

设计了一个中波多光谱成像仪, 谱段覆盖 $3.7 \sim 4.8 \mu m$, 包括大气窗口和大气吸收谱段, 由光学系统、滤光片轮、中波红外探测器以及信号处理模块组成.

光学系统透过谱段为中波 $3.7 \sim 5.8 \mu m$, 其焦距是 125 mm , $F\#$ 数是 $F/2.0$, 总的视场角为 $7.33^\circ \times 5.87^\circ$. 滤光片轮将该谱段细分为有 4 个通带: B1, $3.7 \sim 4.0 \mu m$; B2, $4.1 \sim 4.35 \mu m$; B3, $4.35 \sim 4.6 \mu m$; B4, $4.55 \sim 4.85 \mu m$. 很明显, 在谱段覆盖的全面性上, 所设计的光谱仪均要优于以往的一些设计方案^[13-14].

探测器采用了液氮制冷的 $640 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的中波红外面阵探测器, 像元尺寸为 $25 \mu m \times 25 \mu m$. 支持单通道和四通道的读出模式下, 并支持边积分边读出(IWR), 最高读出帧频高达 120 Hz

(开窗模式下更高), 满阱电子数可达 8 M . 探测器的驱动电子学采用 14 bit 量化, 噪声数字量化值(DN)仅为 7.5 , 符合低噪声设计的要求.

最终的中波红外多光谱成像系统如图 3 所示, 图中不包括光学安装底板以及用以固定光谱仪、动态跟踪的三脚架.

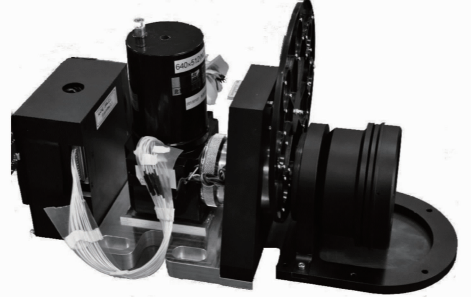


图 3 中波红外多光谱成像仪

Fig. 3 Mid-infrared multispectral imager

4 多光谱测量结果及分析

利用第 2 节中提出的辐射传输模型, 于 2014 年 1 月 23 日下午, 在上海市施宏路某楼顶开展了对民航飞机的实验测量. 该楼位于浦东国际机场跑道北端的正西方向, 与跑道的直线距离约 2.5 km . 天气为晴天, 但是有南风, 跑道北端仅供民航飞机降落, 因而所测得的飞机实际上是处于降落状态, 如图 4(a) 所示.

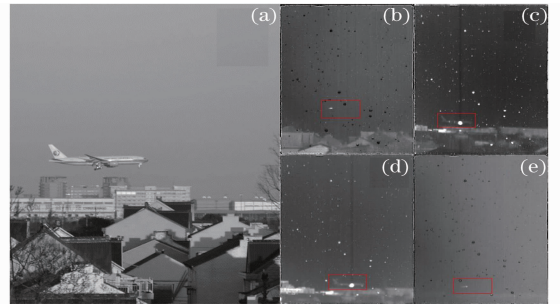


图 4 (a) 可见光实验研究场景; (b) B3 谱段图像; (c) B4 谱段图像; (d) B1 谱段图像; (e) B2 谱段图像

Fig. 4 (a) Visual image of the measurement scenario; (b) image in spectrum B3; (c) image in spectrum B4; (d) image in spectrum B1; (e) image in spectrum B2

4.1 多光谱成像结果

图 4(b) 为飞机降落时在谱段 B3 ($4.35 \sim 4.6 \mu m$) 上的单谱段图像, 这个谱段的一部分落在 CO_2 强吸收/发射带内, 可以很明显地看出飞机羽流, 但是整个机身在这个谱段上辐射亮度很弱, 已无法观测到; 图 4(c) 和 (d) 分别为谱段 B4 和 B1 上, 飞机降落时

的图像。在这两个谱段上,飞机发动机对其外壳的加热使得该部位的辐射亮度非常大,而机体引入的辐射亮度在这两个谱段上也较为明显。

图 4(e)为谱段 B2(4.1~4.35 μm)上飞机降落的图像,这个谱段绝大部分落在 CO_2 的强吸收/发射带内,飞机的羽流辐射亮度与背景的对比非常大,而且 CO_2 的强烈吸收作用也使得观测路径上的背景被极大地衰减和抑制,能够轻易地辨别出羽流。

4.2 光谱辐亮度特性分析

实际飞行过程中,飞机机头与大气摩擦的气动热效应、发动机对其外壳的加热效应以及羽流等构成了飞机红外辐射光谱特性的主要来源。因此,选取这三个代表性区域进行光谱辐亮度的分析。

运用 MODTRAN 软件,可以计算出各个谱段上的大气透射率曲线,如图 5 所示,在 B1~B4 各个

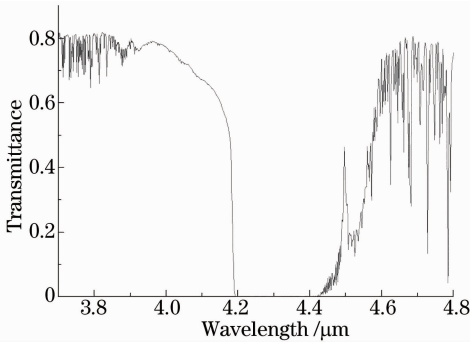


图 5 3.7~4.8 μm 谱段大气透射率

Fig. 5 Spectral transmittance in 3.7~4.8 μm

谱段上的有效光谱透射率分别为 B1:0.78, B2:0.14, B3:0.30, B4:0.70。另由(3)式和(5)式,可以反演出飞机的机头、发动机外壳以及羽流这三个典型区域的光谱辐亮度。

按照第 2 节中的辐射传输模型获取飞机光谱辐亮度时,在 B1~B4 谱段上远端大气背景出现了细小的差异。具体表现为:如图 4(a)所示,有飞机出现在光学视场内时,远端大气背景高于单独测量到的远端大气背景;在 B4 谱段上则正好相反。出现这样的差异的根本原因是二者测量时间不同。对飞机进行实验研究的时间是在下午,而单独测量远端大气背景的时间是在傍晚。因此,光谱辐射亮度需要修正。

将太阳光在大气中的散射作用以及对大气的加热作用考虑进去。具体的方法是,在 B1~B3 谱段上,减掉两次测量的远端大气背景的差值;在 B4 谱段上,加上相应的差值,修正后的光谱辐射亮度见于表 1。从表 1 中可以看出,发动机外壳及羽流是两个非常显著的特征,前者的主要谱段是 B1 和 B4,后者的主要谱段是 B2 及 B3。机头的光谱辐射在各个谱段均较弱,高于大气背景,但已经比较接近。从魏合理等^[15]的测量研究来看,大气背景辐亮度在 B1~B4 谱段上约为 $1.0 \times 10^6 \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})$,对比表 1 中机头的辐亮度数据,不难发现机头辐亮度比大气背景辐亮度要高,但是高出并不多,侧面佐证了实验所测得的辐亮度数据较为可靠。

表 1 B1~B4 各个谱段上的光谱辐亮度

Table 1 Spectral radiances in B1~B4

Spectrum No.	Spectral radiance / [$\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})$]		
	Head	Engine	Plume
B1	5.14×10^{-5}	1.07×10^{-3}	2.44×10^{-5}
B2	4.03×10^{-5}	5.03×10^{-5}	1.29×10^{-3}
B3	2.69×10^{-5}	7.69×10^{-6}	1.06×10^{-3}
B4	3.23×10^{-5}	1.26×10^{-3}	3.10×10^{-5}

在探测和跟踪系统的设计过程中,更多的是利用光谱亮温来模拟未知目标的光谱辐射特性。因而,在表 1 中反演得来的典型区域的红外光谱辐亮度可以进一步用光谱亮温来等效,等效后的亮温数据列在表 2 中。

从表 2 中可以发现,民航飞机下降过程中的亮温高的区域集中在发动机和羽流区域,前者在大气窗口谱段内,亮温高达 370 K 以上;后者在大气吸收区间,亮温高达 360 K 以上。值得注意的是,机头和发动机区域在大气吸收区间内的亮温与实际温度发

生了较大偏差,偏差的来源是在利用(5)式反演时,近似认为带宽很窄,积分区间内的辐亮度看作了一个常量。

表 2 B1~B4 各个谱段上的辐射亮温

Table 2 Brightness temperatures in B1~B4

Spectrum No.	Brightness temperature /K		
	Head	Engine	Plume
B1	296.2	391.6	279.4
B2	276.4	281.4	384.9
B3	260.2	236.4	368.9
B4	257.6	370.0	256.7

在这里引入线性混合光谱模型,该模型认为,目标的辐射强度等于目标各个部位的辐射强度的线性叠加。结合表 1 和表 2 的数据,不难得知发动机的辐射强度或者羽流的辐射强度,均远大于机头为代表的蒙皮区域。此外,对于探测系统而言,目标距离远、以点目标的形式出现的概率极为常见。故探测系统收集到的以民航飞机为代表的目标中波红外 3.7~4.8 μm 上的辐射强度可以表示为

$$J \approx \sum_{i=1,4} \frac{\tau_{ai} A_E}{\pi} \int_{B_i} M(\lambda, T_{E_i}) d\lambda + \sum_{i=2}^3 \frac{\tau_{ai} A_P}{\pi} \int_{B_i} M(\lambda, T_{P_i}) d\lambda, \quad (6)$$

式中 $M(\lambda, T)$ 表示光谱辐出度, τ_{ai} 为各个谱段 $B_i (i=1 \sim 4)$ 上的大气透射率, T_{E1} 和 T_{E4} 分别表示谱段 B1 和 B4 上发动机的亮温, T_{P2} 和 T_{P3} 则分别代表谱段 B2 和 B3 上羽流的亮温,均见于表 2, A_E 和 A_P 分别表示发动机和羽流在突出的亮温谱段上的面积,分别是 4 m^2 和 6.4 m^2 。

4.3 光谱辐射与背景的对比如度

4.1~4.2 节的飞机光谱辐射亮度,最终可为探测相类似目标积累相关数据。实际上,在目标探测领域内,目标与背景的对比如度是一个重要的衡量指标。

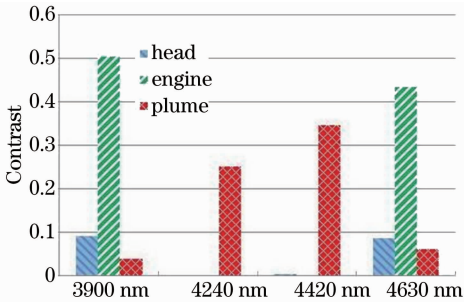


图 6 飞机与背景的对比如度 [(蓝)机头; (绿)发动机外壳; (红)羽流]

Fig. 6 Contrast of the aircraft and background [(blue) head; (green) engine; (red) plume]

第 3 节所设计的中波多光谱成像仪可看作线性系统,因此,飞机光谱辐射与背景的对比如度,可以依据图像灰度值(或图像 DN 值)的对比如度进行分析。在图像处理的过程中,目标与背景的对比如度定义为目标与背景的灰度值之差比上目标与背景的灰度值之和^[16-18]。根据该定义,可以得到各个谱段上机体典型区域与背景的对比如度,如图 6 所示。

B1 和 B4 谱段上,飞机发动机外壳的辐射亮度非常高,所获取的图像对比如度也很大,接近了 0.5;

但是这两个谱段上,发动机羽流的辐射亮度很小,接近背景,因此其对比如度小于 0.08。这是因为羽流成分为 CO_2 和水,而 B1 和 B4 正好避开了其强发射带; B2 和 B3 谱段部分落入 CO_2 的强发射带,因而羽流的辐射亮度特别突出,在对比如度上,分别达到了 0.25 和 0.34,远大于飞机机头和发动机外壳与背景的对比如度。由图 4 可知,在 B2 和 B3 谱段上,机头和发动机外壳已经与背景无法区分开来。

综合图 4 与图 6 可知,飞机的光谱辐射与背景的光谱辐射在对比如度低至 0.1 时,仍然可以找出飞机的轮廓。但是,当对比如度更低时,飞机在该谱段上与背景便很难区分开来。可以认为,对比如度 0.1 是一个临界分辨点。

5 结 论

对飞机的红外辐射在中波红外 3.7~4.8 μm 谱段上的光谱特性获取研究进行了理论建模及外场实验,以所提出的飞机机体、羽流的辐射传输模型为基础,借助所设计的滤光片分光,4 谱段中波红外多光谱成像仪,对下降过程中的民航飞机进行了获取研究,获取了机体及羽流在 4 个谱段上的辐射特性。修正后的光谱辐亮度表明,发动机外壳在 B1 和 B4 谱段特征非常明显,羽流在 B2 和 B3 谱段特征显著,而机头则因为飞行速度较低导致的空气散热作用,使得在各个谱段上光谱辐亮度都很弱。

整个研究过程提出了一套测量处在飞行状态的飞机的红外光谱辐射特性的方法和仪器手段,根据对辐射传输模型的分析可知,对飞机的上升过程亦同样适用,但对巡航状态的飞机进行实验测量时,则需要稳定的跟踪平台,才能获得相应状态下的光谱辐亮度。

在后续的研究工作中,需要在同一时刻测量远端大气背景;并要考虑高速滤光片轮控制技术,提高观测帧频;进一步分析和定制滤光片中心波长和带宽,提高测量的效率和针对性。

参 考 文 献

- Du Shenghua, Gong Jiaming, Xia Xinlin. Infrared characteristics of a spacecraft [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(2): 432-436.
- 杜胜华, 龚加明, 夏新林. 某飞行器红外辐射特性研究[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 432-436.
- Zhang Ke, Li Ning, Liu Fumei, et al.. Method of aircraft skin infrared radiation image generating [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(3): 273-277.
- 张可, 黎宁, 刘福美, 等. 一种飞行器蒙皮红外辐射图像生成方法[J]. 激光与红外, 2011, 41(3): 273-277.

- 3 Lü Jianwei, Wang Qiang. Numerical calculation and analysis of infrared radiation characteristics from aircraft skin by using RMC method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 232–237.
吕建伟, 王 强. 飞行器蒙皮红外辐射特征的反向蒙特卡罗计算与分析方法[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 232–237.
- 4 Xu Dingguo, Feng Weilin, Sang Jianhua. IR characteristics of aircraft aft fuselage skin [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 7–13.
徐顶国, 冯维林, 桑建华. 飞行器后机身蒙皮红外辐射特性[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 7–13.
- 5 Luo Mingdong, Ji Honghu, Huang Wei, *et al.*. Research on measurement of mid-IR spectral radiant intensity of exhaust system with FTIR spectrometer [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(9): 1423–1429.
罗明东, 吉洪湖, 黄 伟, 等. 用 FTIR 光谱仪测量排气系统中红外光谱辐射强度的方法[J]. *航空动力学报*, 2007, 22(9): 1423–1429.
- 6 Jörg Heland, Klaus Schäfer. Analysis of aircraft exhausts with Fourier-transform infrared emission spectroscopy [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(21): 4922–4931.
- 7 Gregor Schürmann, Klaus Schäfer, Carsten Jahn, *et al.*. The impact of NO_x, CO and VOC emissions on the air quality of Zurich airport [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(1): 103–118.
- 8 Zhao Jianhua, Zhao Chongwen, Wei Zhoujun, *et al.*. Study on monitoring multi-component toxic gases based on near-infrared spectroscopic method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 567–573.
赵建华, 赵崇文, 魏周君, 等. 基于近红外光谱技术的多组毒性气体检测研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 567–573.
- 9 Long Jingming, Zhou Weidong, Wu Zhiwei. A high sensitive spectral detection system of gaseous measurements based on LabVIEW [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0115003.
龙精明, 周卫东, 吴志伟. 基于 LabVIEW 的气体高分辨率光谱探测系统[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0115003.
- 10 Shang Liang, Zhang Lichun, Qi Limei. Design of hollow-core Bragg fiber with broadband transmission for trace-gas detection [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0205004.
尚 亮, 张立春, 亓丽梅. 面向痕量气体检测的宽带空心布拉格光纤设计[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0205004.
- 11 Liu Yingqi, Liu Xiangyi. Research on technology of ground-based infrared radiation feature measurement for space target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0512003.
刘莹奇, 刘祥意. 空间目标的地基红外辐射特性测量技术研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0512003.
- 12 Wang Jianyu, Shu Rong, Liu Yinnian, *et al.*. *Imaging Spectrum Technology Introduction* [M]. Beijing: Science Press, 2011. 29–78.
王建宇, 舒 嵘, 刘银年, 等. *成像光谱技术导论*[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 29–78.
- 13 Thomas Svensson, Ingmar Renhorn. Multispectral MWIR imaging sensor [C]. *SPIE*, 2003, 4820: 116–125.
- 14 Lan Weihua, Wan Min, Wang Kai, *et al.*. The study of MWIR multispectral imaging technology [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(2): 59–62.
兰卫华, 万 敏, 王 凯, 等. 中波红外多光谱成像技术研究[J]. *光电工程*, 2012, 39(2): 59–62.
- 15 Wei Heli, Chen Xiuhong, Dai Congming, *et al.*. Ground-based measurements of infrared atmospheric background spectral radiances [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 284–290.
魏合理, 陈秀红, 戴聪明, 等. 地基大气背景红外光谱辐射特性测量[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 284–290.
- 16 Jin Weiqi, Gao Shaoshu, Wang Jihui, *et al.*. A model to predict range performance of imaging system for extended target based on minimum resolvable contrast [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(6): 1552–1556.
金伟其, 高绍姝, 王吉晖, 等. 基于光电成像系统最小可分辨对比度的扩展源目标作用距离模型[J]. *光学学报*, 2009, 29(6): 1552–1556.
- 17 Srinivasa G Narasimhan, Shree K Nayar. Contrast restoration of weather degraded images [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(6): 713–724.
- 18 Ji Lailin, Liu Chong, Tang Shunxing, *et al.*. Phase perturbation of large aperture KDP crystal manufacture and effects on third harmonics generation [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0502012.
季来林, 刘 崇, 唐顺兴, 等. 大口径 KDP 晶体加工相位扰动与三次谐波转换[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0502012.

栏目编辑: 史 敏