

## 火箭尾焰的空间外差光谱探测可行性分析

袁纵横<sup>1</sup>, 李 树<sup>1</sup>, 叶 松<sup>1\*</sup>, 熊 伟<sup>2</sup>, 王新强<sup>1</sup>, 汪杰君<sup>1</sup>

(1. 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘 要:** 为了跟踪和识别飞行的火箭, 利用空间外差光谱仪对火箭尾焰辐射中钾光谱的 766.490 nm 和 769.896 nm 两条谱线进行研究。考虑大气分子吸收和大气散射对钾光谱在大气中传输的影响, 采用逐线积分法、瑞利散射公式及散射系数与气象视程的关系分别计算 763~773 nm 波段内的氧气的吸收系数、大气分子及粒子散射系数, 使用比尔-朗伯定律计算透过率。通过分析该波段内太阳辐射光谱和大气透过率可知, 钾特征谱线处于太阳辐射强度弱、大气传输效率高的位置, 从理论上验证了钾光谱探测的可行性。然后使用空间外差光谱仪对在火焰上燃烧的  $K_2SO_4$  进行探测, 获得了与理论数据相符的实验数据, 为火箭尾焰的空间外差光谱探测方法提供依据。

**关键词:** 火箭尾焰; 钾光谱; 空间外差光谱; 氧气吸收; 大气散射

**中图分类号:** O433 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-2867-07

## Feasibility analysis of rocket plume detection based on spatial heterodyne spectroscopy

Yuan Zongheng<sup>1</sup>, Li Shu<sup>1</sup>, Ye Song<sup>1\*</sup>, Xiong Wei<sup>2</sup>, Wang Xinqiang<sup>1</sup>, Wang Jiejun<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. Key Laboratory of General Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** For tracking and recognizing a flying rocket, potassium 766.490 nm and 769.896 nm in rocket plume radiation spectrum were studied by the spatial heterodyne spectroscopy. The atmospheric molecular absorption and atmospheric scattering were considered in the atmospheric transmission model. In 763~773 nm, oxygen absorption coefficient was calculated by using line-by-line method, and atmospheric scattering coefficient was calculated by Rayleigh scattering formula and the relationship between scattering coefficient and meteorological visibility. Transmittance was calculated based on Lambert-Beer law. The analyses of solar radiation spectrum and atmospheric transmittance show that these two characteristics of potassium lines in the location which solar radiation intensity is weak and high transmission efficiency, and theoretically verify the feasibility of detection of potassium spectrum. Then, the spatial heterodyne spectrometer was used to detect potassium spectrum that  $K_2SO_4$  was burned in flames. The experimental datum are accordant with the theoretical results, which demonstrate that the potassium line detection scheme is feasible

收稿日期: 2015-02-07; 修订日期: 2015-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(41201342); 广西自然科学基金(2013GXNSFAA019328, 2012GXNSFBA053170); 广西自动

检测技术与仪器重点实验室基金(YQ14101); 桂林电子科技大学创新团队资助项目

作者简介: 袁纵横(1957-), 男, 教授, 博士, 主要从事光电探测方面的研究。Email: yuanzongheng@sina.com

\* 通讯作者: 叶松(1979-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光学遥感方面的研究。Email: yesongmail@sina.com

using spatial heterodyne spectrometer.

**Key words:** rocket plume; potassium spectrum; spatial heterodyne spectroscopy; oxygen absorption; atmospheric scattering

## 0 引言

目前对火箭尾焰的探测研究主要是在  $2.7\ \mu\text{m}$  和  $4.3\ \mu\text{m}$  附近的波段进行的<sup>[1-2]</sup>, 而近红外光谱探测与识别是近年发展起来的一个研究热点。在近红外波段存在一些特征谱线, 可以用于跟踪和判别在复杂背景环境(太阳反射、人为干扰源等)下飞行的火箭。最有可能被应用于跟踪和识别的谱线是钠原子和钾原子的发射谱线, 因为火箭推进剂的燃烧尾焰中存在这两种原子的谱线, 且这些谱线处在太阳辐射强度弱、大气吸收小的位置, 军事上实现对钾  $766.490\ \text{nm}$  和  $769.896\ \text{nm}$  这两条谱线的探测具有重要意义。相关的研究主要有: 美国陆军实验室 Joseph Montoya<sup>[3]</sup>等人研究小型武器出口闪光的光谱探测方法。M&M 航空和美国空军实验室的研究人员, 研究了应用于飞行器观测系统的近红外光谱探测器并基于该探测器提出了探测和识别目标光谱信号的方法<sup>[4]</sup>。

空间外差光谱 (Spatial Heterodyne Spectroscopy, SHS)<sup>[5-6]</sup> 技术将衍射光栅和空间调制干涉仪技术融合于一体, 在一定的光谱范围内, 可实现超高分辨光谱探测, 同时具有干涉仪的高通量 (即高灵敏度) 特性。在仪器尺寸同等的情况下, 扩视场的 SHS 的光通量一般比傅里叶变换光谱仪 (FTS) 高两个数量级, 比光栅光谱仪则高四个数量级<sup>[5]</sup>。火箭尾焰辐射的光谱在大气中传输会有不同程度的衰减 (大气吸收、散射等), 使得到达探测器的信号强度很弱。在火箭尾焰光谱探测中, 高灵敏度的 SHS 具有更强的探测能力。同时 SHS 的高分辨率也有助于了解火箭尾焰中钾谱线的轮廓。例如, 火箭尾焰中钾光谱是否存在参考文献 [7] 中提到的自吸现象。因此, 研究基于空间外差光谱技术的火箭尾焰高光谱探测对火箭尾焰的识别与跟踪方法具有重要意义。

## 1 空间外差光谱技术<sup>[5]</sup>

空间外差光谱仪采用两个倾斜放置的衍射光栅

代替传统迈克尔逊干涉仪中两个平面反射镜, 其结构如图 1 所示。被测光通过光阑 A, 经准直镜 L1 形成平面波, 入射到分束器上分为强度相等的两束相干光, 分别由光栅 G1、G2 衍射后返回到分束器, 两出射光束的波面形成一定的夹角, 形成空间调制的干涉条纹, 经过 L2、L3 成像于面阵探测器上。探测器所记录的干涉条纹经傅里叶变换后即可获得被测光的光谱曲线。

如图 1 的空间外差光谱仪中, 光栅位置固定, 以  $\theta$  角倾斜放置, 两轴向光分别以  $\theta$  角入射到两个光栅上, 某一波数的光沿原方向衍射返回, 该波数即为光栅的 Littrow 波数, 此时的角即为光栅的 Littrow 角。Littrow 波数的光束经两光栅衍射后的出射波面均与光轴垂直, 两束光的相位差为零, 形成零频率的空间干涉条纹。非 Littrow 波数的光经两光栅衍射返回后, 两出射波面与光轴正交面形成夹角  $\pm\gamma$ , 故形成一定频率的空间干涉条纹。

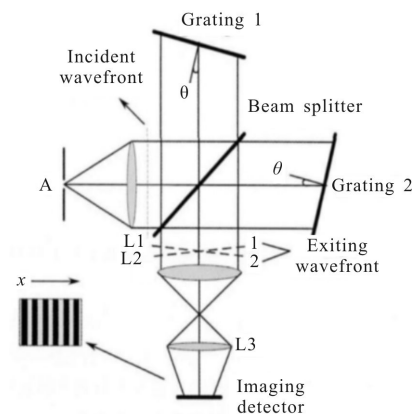


图 1 空间外差光谱仪原理图

Fig.1 Schematic diagram of SHS configuration

不同波数的光从光栅出射时的波面与光轴正交面的夹角  $\gamma$  取决于公式 (1) 的光栅方程:

$$\sigma[\sin\theta + \sin(\theta - \gamma)] = m/d \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为入射光的波数;  $\theta$  为光栅的 Littrow 角;  $m$  为光栅的衍射级 (通常  $m=1$ );  $1/d$  为光栅的刻线密度。若某一波数为  $\sigma$  的光束入射空间外差光谱仪与 Littrow 波数  $\sigma_0$  的光束出射波面的夹角为  $\gamma$ , 则两光栅出射光波面相差角度为  $2\gamma$ , 波数为  $\sigma$  的两光束形

成干涉条纹的空间频率为:

$$f=2\sigma\sin\gamma\approx 4(\sigma-\sigma_0)\tan\theta \quad (2)$$

当入射光的光谱曲线为  $B(\sigma)$  时,所形成的干涉图:

$$I(x)=\int_0^{\infty} B(\sigma)\{1+\cos\{2\pi[4(\sigma-\sigma_0)xtan\theta]\}\}d\sigma \quad (3)$$

通过对干涉图  $I(x)$  进行傅里叶变换即可得到光谱曲线  $B(\sigma)$ 。干涉图傅里叶变换光谱的区间为  $\sigma_0\pm\Delta\sigma$ ,其中  $\sigma_0$  为系统基频, $\Delta\sigma$  为光谱范围。因此,通过选择特定的系统基频  $\sigma_0$ ,并设定一个较小的光谱范围  $\Delta\sigma$ ,即可获得极高的光谱分辨率。

## 2 钾谱线在大气中的传输

光在大气中传输的衰减因素有:(1)大气分子的吸收;(2)大气分子和大气粒子的散射;(3)气象条件(雨、雪、云、雾)的衰减。假设探测时没有雨、雪、云、雾,计算大气的透过率就只考虑大气分子的吸收和大气散射这两个消光因子。

### 2.1 大气分子吸收

钾原子的 766.490 nm 和 769.896 nm 两条特征谱线处在氧气吸收 A 带中,目前已经证明在氧气吸收带 A(755~778 nm)<sup>[8]</sup>中只有氧气一种吸收分子,不受水汽和二氧化碳等大气分子吸收的影响。因此只需研究氧气一种气体的吸收,根据钾原子这两条谱线所处的位置,且充分考虑计算精度和计算速度后采用逐线积分模型计算 763~773 nm 波段范围内的氧气吸收系数。

使用逐线积分模型计算氧气的吸收系数所需要的线强、半宽、低能级的能量、谱线空气半宽的温度依赖系数等参数都可以从 HITRAN 数据库中得到。文中使用 JavaHAWKS 在温度为 296 K、一个标准大气压条件下从 HITRAN2008 数据库中获取这些参数。绝大多数情况下,实际测量环境的温度和压强跟预设的值不一样,应根据公式(4)、(5)对谱线的线强和洛伦兹半宽  $\gamma_L$  进行校正。

$$S=S_0\left(\frac{T_0}{T}\right)^\beta\exp\left(\frac{E''}{k_B T_0}-\frac{E''}{k_B T}\right) \quad (4)$$

式中: $S_0$  为标准状态下的线强; $E''$  为低能级的能量; $k_B$  为玻耳兹曼常数;线型分子  $\beta=1$ 、非线性形分子  $\beta=1.5$ 、臭氧  $\beta=2.5$ 。氧气是一种线形分子,因此这里指

数  $\beta$  应取 1。

$$\gamma_L(P,T)=\gamma_{L0}(P_0,T_0)\cdot(P/P_0)\cdot(T_0/T)^n \quad (5)$$

式中: $\gamma_{L0}(P_0,T_0)$  为标准状态下的洛伦兹半宽; $n$  为的  $\gamma_L$  温度依赖系数。

采用 Voigt 线型计算吸收系数,其表达式为:

$$K(x,y)=\frac{y}{x}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{\exp(-t^2)}{(x-t)^2+y^2}dt \quad (6)$$

归一化后为:

$$F_\nu(\nu-\nu_0)=\frac{1}{\gamma_D}\left(\frac{\ln 2}{\pi}\right)0.5K(x,y) \quad (7)$$

式中: $x=\frac{\nu-\nu_0}{\gamma_D}(\ln 2)^{1/2}$ , $y=\frac{\gamma_L}{\gamma_D}(\ln 2)^{1/2}$ ; $\gamma_D$  是多普勒半

宽。公式(6)是无穷积分运算且没有精确解,为了提高运算效率采用参考文献[9]的方法进行计算。在计算某一频率吸收系数时应该考虑无穷远处吸收线线翼对该频率吸收强度的贡献,但这样计算量大、耗时长。谱线强度和谱线的远翼存在某种误差和不确定性,因此在实际计算过程中根据实际需求在离开吸收中心的某一波数处将吸收线的线翼影响截断<sup>[10]</sup>。

假设  $\Delta\nu_{cut}$  为截断的宽度,且令:

$$\Delta\nu_{cut}=\beta\gamma_L \quad (8)$$

式中: $\beta$  为一个整数。根据参考文献[10],当  $\beta$  分别取 127、300 时,则可认为对应的谱线强度的 0.5% 和 0.2% 将被忽略不计。为了部分补偿截断造成的误差,将谱线强度做如下修正:

$$S'=\frac{S}{1-\frac{2}{\beta\pi}} \quad (9)$$

使用上述的逐线积分模型,取  $0.01\text{ cm}^{-1}$  为积分采样间隔,在标准状况下,计算氧气在 763~773 nm 范围内的吸收系数如图 2 所示。

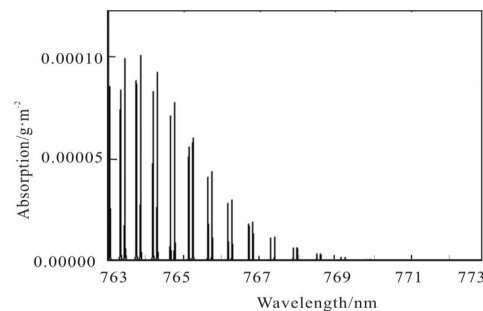


图 2 氧气的吸收系数

Fig.2 Oxygen absorption coefficient

### 2.2 大气散射

大气散射主要有大气分子散射和大气粒子散射,大气分子散射属于瑞利散射、大气粒子散射属于米氏散射。大气的散射系数  $\mu_s = \mu_m + \mu_p$ , 其中  $\mu_m$ 、 $\mu_p$  分别为大气分子散射系数和大气粒子散射系数。大气分子的散射系数  $\mu_m$  可通过下式计算<sup>[11]</sup>:

$$\mu_m = \frac{2\pi^2(n^2 - 1)^2}{3N\lambda^4} \times \left( \frac{6 + 3P_n}{6 - 7P_n} \right) \times 0.7629 \times (1 + 0.9324 \cos^2 \theta_s) \quad (10)$$

式中:  $N$  为气体分子数密度;  $\lambda$  为入射光波长;  $n$  为大气折射率;  $P_n$  为退偏振因子, 空气取 0.035;  $\theta_s$  为散射角。其中大气的折射率通过下式计算:

$$n(P, R, \lambda) = 1 + \frac{0.01P}{T} \times \left[ 1 + 0.01P(57.90 \times 10^{-8} - \frac{9.3250 \times 10^{-4}}{T} + \frac{0.25844}{T^2}) \times \left( \frac{2371.34 + \frac{6839397}{130 - \lambda^{-2}} + \frac{4547.3}{38.9 - \lambda^{-2}}}{10^{-8}} \right) \right] \quad (11)$$

式中:  $T$  为温度(K);  $P$  为大气压强(Pa);  $\lambda$  单位为  $\mu\text{m}$ ; 大气分子数密度与温度和压强的关系如下:

$$N = \frac{N_A}{R} \cdot \frac{P}{T} \quad (12)$$

式中:  $N_A$  为阿佛加德罗常数。

在工程计算大气粒子散射系数时, 可以利用气象视程来确定。气象视程定义为目标与背景的对比度随距离的增加而减小到 2% 的距离。大气的散射系数可用气象视程来表示<sup>[12]</sup>:

$$\mu_p(\lambda) = \frac{3.91}{D_v} \left( \frac{0.55}{\lambda} \right)^q \quad (13)$$

式中:  $\mu_p$  为大气粒子散射系数( $\text{km}^{-1}$ );  $D_v$  为气象视程(km); 0.55 为测试  $D_v$  所用的波长( $\mu\text{m}$ );  $q$  为经验常数一般取

$$\begin{cases} q=0.585D_v^{1/3} & D_v < 6 \text{ km} \\ q=1.3 & 6 \text{ km} \leq D_v < 80 \text{ km} \\ q=1.6 & D_v \geq 80 \text{ km} \end{cases} \quad (14)$$

由公式(13)可知, 大气粒子的散射强度与气象视程成反比, 也就是说大气的能见度越高, 大气的散射就越小。

### 2.3 透过率的计算

根据 2.1 和 2.2 节, 在探测火箭探测中笔者主要

考虑的消光系数有氧气吸收的衰减系数  $\mu_{O_2}$  和大气粒子的散射系数  $\mu_s$ 。  $\mu_{O_2} = K_V \rho$ ,  $\rho$  为氧气的密度、 $K_V$  是氧气的吸收系数。根据比尔-朗伯定律可求出所选波段范围内, 各单色光的大气透过率为:

$$T(\nu) = \exp \left( - \int_0^L (\mu_{O_2} + \mu_s) dL \right) \quad (15)$$

式中:  $L$  为被测目标到探测器的距离。在斜程透过率<sup>[13]</sup>计算中必须考虑在不同的高度层中, 由于大气的压强、温度和氧气浓度不同造成消光系数的不同。而水平方向透过率的计算, 可以认为单色光的消光系数是一个常数。

在温度为 296 K, 一个标准大气压、气象视程为 30 km、氧气浓度为 148  $\text{g}/\text{m}^3$  的环境下, 使用公式(15)计算 10 km 水平路径大气的透过率。图 3(a)是在上述条件下氧气透过率, 766.490 nm 和 769.896 nm 处的值分别为 0.987 和 0.752; 图 3(b)是考虑到大气散射后的大气透过率, 766.490 nm 和 769.896 nm 处的值分别为 0.358 和 0.279。对比图 3 中(a)、(b)可以看出, 这两条谱线在大气中传输主要的衰减是来自大气的散射而大气分子吸收是很小的。值得注意的是 769.896 nm 这条谱线是处在氧气的吸收线上, 但其吸收强度不强。

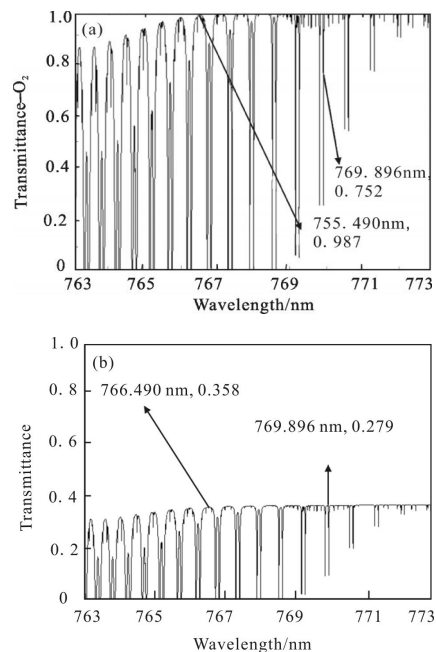


图 3 氧气透过率与大气透过率的差异  
Fig.3 Difference between oxygen transmittance(a) and atmospheric transmittance(b)

图 4 是 764~773 nm 波段太阳辐射光谱数据<sup>[14]</sup>和图 3(b)中的透过率。通过图 4 可以看到太阳 766.5 nm 和 769.9 nm 这条谱线的辐射强度相对很弱即背景干扰弱,大气在这两条谱线附近的透过率较高即传输效率高。以上结果表明钾元素的 766.5 nm 和 769.9 nm 这两条谱线的辐射信号能有效穿透大气,并被具有高光谱分辨、高通量的探测器所探测。

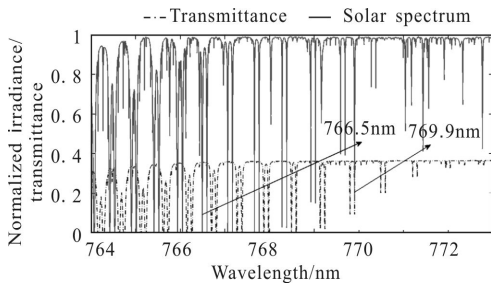


图 4 764~773 nm 波段的太阳辐射光谱和大气透过率  
Fig.4 764-773 nm solar spectrum and transmittance

### 3 空间外差光谱仪测钾谱线实验

文中使用中国科学院安徽光机所研制的空间外差光谱仪在野外对硫酸钾在火焰上燃烧的光谱进行观测,观测的距离为 10 m。空间外差光谱仪的主要参数为:光栅 Littrow 波长为 771 nm;光谱范围为 756~771 nm;光谱分辨率约为 0.03 nm;视场角  $\theta$  为  $4^\circ$ 。在空间外差光谱仪视场角内的目标光谱,只要光谱信号能够满足空间外差光谱仪响应要求就可以被其有效探测。SHS 的探测示意图,如图 5 所示。

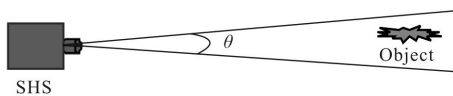


图 5 SHS 探测示意图  
Fig. 5 SHS detection diagram

观测得到的原始干涉图如图 6 (a)、(c)所示。空间外差光谱仪所得到的原始数据是目标源的分光干涉图数据,它是空间域数据,原始数据会受到一定的干扰。在实验条件下受到干扰的主要为噪声和探测器响应不均匀性。在经过 CCD 响应非均匀校正后得到的干涉图如图 6(b)、(d)所示。

对二维干涉图进行一维采样并处理。首先对干

涉图进行预处理,利用一阶差分去基线;然后对干涉图进行切趾处理;并对干涉图进行相位校正;最后对傅里叶变换光谱进行波长定标,得到的结果如图 7 所示。图 7(a)、(b)、(c)、(d)、(e)分别为大气背景干涉图、大气背景傅里叶变换光谱图、含大气背景下的  $K_2SO_4$  干涉图、含大气背景下的  $K_2SO_4$  傅里叶变换光谱图、去大气背景后的  $K_2SO_4$  光谱图。图 7(e)的光谱图中,两个峰值分别对应钾光谱的 769.896 nm、766.490 nm,在横坐标的位置分别为 59、176。通过计算获得该实验室使用的空间外差光谱仪的光谱分辨率达到 0.0291 nm,分辨能力约为 26 500,光谱范围为 14.9 nm(756.7~771.6 nm)。实验结果表明使用空间外差光谱仪可以有效探测大气背景下的钾光谱信号。

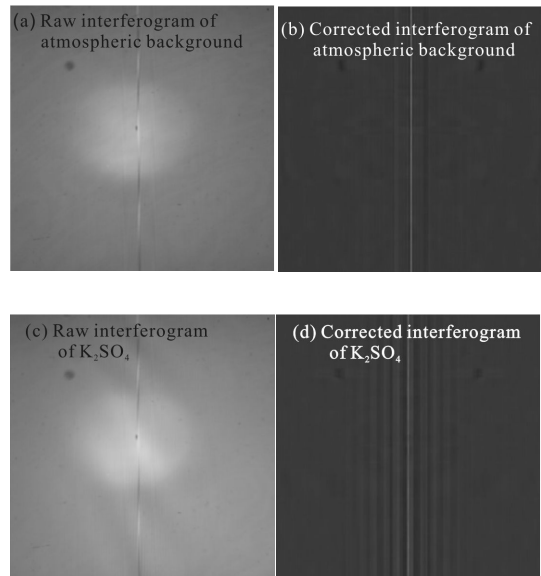
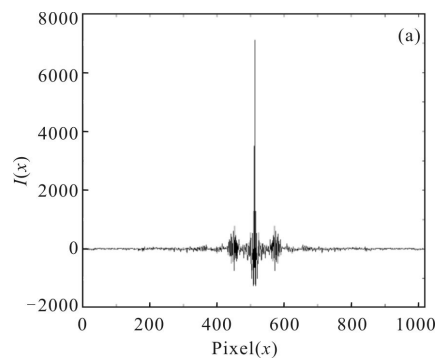
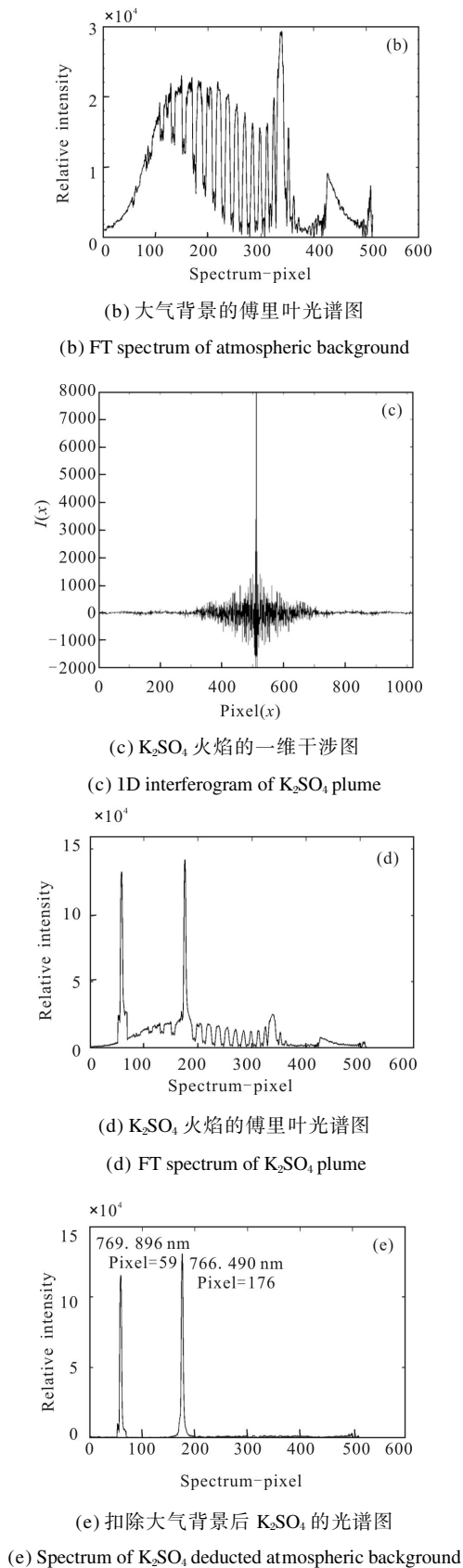


图 6  $K_2SO_4$  燃烧实验干涉图  
Fig.6 Interferograms of  $K_2SO_4$  combustion experiment



(a) 大气背景的一维干涉图  
(a) 1D interferogram of atmospheric background

图 7  $K_2SO_4$  燃烧实验结果Fig.7 Results of  $K_2SO_4$  combustion experiment

## 4 结论

文中考虑大气散射和大气分子吸收对光的衰减作用,计算 763~773 nm 波段大气水平方向上的透过率。通过计算结果我们可以看到钾 766.490 nm 和 769.896 nm 这两条谱线是在大气中传输主要衰减因素是大气散射吸收,而大气分子的吸收很小。因此,在良好的气象环境下这两条谱线的大气传输效率比较高。并且在这两个谱线位置,太阳的辐射也很弱即探测背景干扰弱。这些因素为探测钾元素的 766.490 nm 和 769.896 nm 这两条谱线,并实现对火箭的跟踪、探测提供有利条件。空间外差光谱仪对在火焰上燃烧的  $K_2SO_4$  进行光谱探测的实验结果表明,空间外差光谱技术能对钾光谱进行有效地探测与识别,为火箭尾焰的空间外差光谱探测方法提供依据。

## 参考文献:

- [1] Ye Qing, Sun Xiaoquan, Shao Li. Analysis of optimum detective wavebands for infrared early-warning satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 389-393. (in Chinese)  
叶庆, 孙晓泉, 邵立. 红外预警卫星最佳探测波段分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(3): 389-393.
- [2] Chen Wei, Wang Zhongxian, Ma Donghui, et al. Calculation and simulation of infrared radiation characteristics of non-uniform hot gas [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 17-21. (in Chinese)  
陈卫, 汪中贤, 马东辉, 等. 非均匀热气体红外辐射特性计算与仿真[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(1): 17-21.
- [3] Joseph Montoya, Steve Kennerly, Edward Rede. NIR small arms muzzle flash [C]//Proceedings of SPIE, Design, Analysis, Modeling, and Testing XXI, 2010, 7662: 1-12.
- [4] Joel B Montgomery, Richard B Sanderson, John F McCalmont, et al. An advanced missile warning processing suite [C]//Proceedings of SPIE, 2008, 6969: 1-10.
- [5] Ye Song, Fang Yonghua, Hong Jin, et al. System design of spatial heterodyne spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(6): 959-964. (in Chinese)  
叶松, 方勇华, 洪津, 等. 空间外差光谱仪系统设计[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6): 959-964.
- [6] Yang Yong, Xiong Wei, Ye Qinghao, et al. Experiments of

- flat-field wavelength calibration of spatial heterodyne spectrometer and its data processing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(10): 2508–2512. (in Chinese)
- 杨勇, 熊伟, 叶擎昊, 等. 空间外差光谱仪的平场波长定标实验与数据处理[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2508–2512.
- [7] Joel B Montgomery, Christine T Montgomery, Richard B Sanderson, et al. A spectral independent morphological adaptive classifier [C]//Proceedings of SPIE, Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XVI, 2007, 6567: 1–12.
- [8] Yan Zongqun, Liu Bingqi, Hua Wenshen, et al. Short-range experiment of passive ranging by oxygen absorption [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2744–2750. (in Chinese)
- 闫宗群, 刘秉琦, 华文深, 等. 利用氧气吸收被动测距的近距离实验[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2744–2750.
- [9] Kuntz J M. A new implementation of the Humlicek algorithm for the calculation of the Voigt profile function [J]. *J Quantit Spectrosc and Radiative Transfer*, 1997, 57(6): 819–824.
- [10] Zhang Hua, Shi Guangyu. A fast and efficient line-by-line calculation method for atmospheric absorption [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, 24(1): 111–121. (in Chinese)
- 张华, 石广玉. 一种快速高效的逐线积分大气吸收计算方法[J]. 大气科学, 2000, 24(1): 111–121.
- [11] Hu Yun, Liao Zhijie, Xing Tingwen. Simulation of backscatter intensity in ultraviolet laser system [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2007, 19(3): 230–235. (in Chinese)
- 胡云, 廖志杰, 邢廷文. 紫外激光雷达后向散射光强的模拟计算[J]. 光散射学报, 2007, 19(3): 230–235.
- [12] Zhang Heyong, Wang Tingfeng, Shao Junfeng, et al. measurement of CO<sub>2</sub> laser atmospheric transmission property based on Mie scattering [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(4): 353–362. (in chinese)
- 张合勇, 王挺峰, 邵俊峰, 等. 基于 Mie 散射的 CO<sub>2</sub> 激光大气传输特性测量[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(4): 353–362.
- [13] Lu Yuan. Simple method to calculate the atmosphere transmittance of infrared radiation on slanting route [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 423–426. (in Chinese)
- 路远. 斜程红外辐射大气透射率的简易计算[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S): 423–426.
- [14] Delbouille L, Neven Roland G. BASS2000, Photometric atlas of the solar spectrum from 3000 to 10000 angstroms [EB/OL]. [2014–05–07]. [http://bass2000.obspm.fr/solar\\_spect.php](http://bass2000.obspm.fr/solar_spect.php).