

基于空间外差的钾盐光谱探测与提取研究

王新强^{1,2}, 王欢^{1,2}, 叶松^{1,2}, 汪杰君^{1,2}, 张文涛^{1,2}, 王方原^{1,2*}

(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. 广西光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 含钾消焰剂的使用, 大大降低了火箭尾焰的二次燃烧及辐射量, 提高了对其探测与追踪的难度。基于空间外差光谱技术微弱光谱信号精细探测的优势特性, 采用自行设计的近红外波段仪器, 以室外天空为背景, 用酒精喷灯火焰模拟火箭尾焰, 实验研究了其中钾盐信号的探测, 并以现代谱估计方法中的自回归 AR 算法和 MUSIC 算法对测量信号进行提取研究。结果表明, 两种算法均能实现对钾特征信号的提取及对噪声的抑制, 使特征信号的峰宽变得更窄, 其中 AR 算法对钾 766.49 nm 特征峰的半峰宽减小率为 21%, 噪声减小率为 42%; MUSIC 算法对钾特征峰的半峰宽减小率为 50%, 噪声减小率为 47%, 两相比较可见 MUSIC 算法的效果更好, 说明将空间外差技术应用于火箭等喷射式飞行器的识别具有可行性。

关键词: 遥感; 空间外差光谱仪; 钾光谱; 信号提取

中图分类号: O433.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0117002

Potassium spectrum detection and extraction based on spatial heterodyne

Wang Xinqiang^{1,2}, Wang Huan^{1,2}, Ye Song^{1,2}, Wang Jiejun^{1,2}, Zhang Wentao^{1,2}, Wang Fangyuan^{1,2*}

(1. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin 541004, China)

Abstract: The secondary combustion radiation of rocket plume can be significantly reduced by using potassium flame agent, which leads to unprecedented improvement of missile invisibility. With the advantage of spatial heterodyne spectroscopy on weak spectrum signal detailed detection, potassium signal detection experiment in missile plume spectrum was performed by a near infrared spectrum instrument. Alcohol burner flame was used to simulate the missile plume, while the outside sky was regarded as background. Two of the modern spectral estimation methods, Autoregressive AR algorithm and MUSIC algorithm, were used to extract the potassium signal. Both algorithms can suppress noise, extract potassium signal and narrow the width of its characteristic peaks. For AR algorithm, the characteristic peak of 766.49 nm reduce 21% respectively, and noise reduce 42%. While for MUSIC algorithm, those characteristic peak reduce 50% and noise reduce 47%. The results illustrate that MUSIC algorithm has a

收稿日期: 2018-08-10; 修订日期: 2018-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(41561079); 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室研究项目; 广西自动检测技术与仪器重点实验室基金(YQ16105, YQ17108); 桂林电子科技大学创新团队项目

作者简介: 王新强(1977-), 男, 硕士生导师, 硕士, 主要从事光学测量和高光谱遥感等方面的研究。Email: xqwang2006@126.com

better performance, and the application that using spatial heterodyne technology to identify the jet aircraft such as missiles is feasible.

Key words: remote sensing; spatial heterodyne spectrometer; potassium spectrum; signal extraction

0 引言

火箭类飞行器探测主要在于飞行尾焰的探测,目前尾焰的探测研究主要集中在紫外和红外波段的辐射探测^[1-4]。随着火箭隐身技术的发展,“低信号特征”成为其推进系统的固有要求,消焰剂的广泛使用,大大降低了尾焰的二次燃烧及辐射量,使探测的难度极大提高,因此发展新的探测方法与技术成为迫切的需求。国内外研究表明有机或无机钾盐是消焰剂配方的固定成分^[5],因此探测钾盐燃烧时的光谱信号作为火箭识别及追踪的指标具有可行性。美国最先开展了相关研究,其陆军实验室和空军实验室提出了火箭尾焰特定目标光谱探测的相关方法^[6]。

空间外差光谱 (Spatial Heterodyne Spectroscopy, SHS) 技术是一种新式的超分辨率光谱遥感探测技术,它综合了光栅及无动镜剪切干涉技术于一体,同时具有衍射、干涉和空间调制等特点,能在被测目标特征波长中心范围探测,可获得较高的光谱分辨率与信噪比,在微弱光谱信号检测方面具有独特优势。目前该技术主要应用于大气痕量气体成分和星际介质等方面的探测^[7-12]。将空间外差技术应用于火箭尾焰钾线光谱的探测具有重要军事和科学价值。文中基于自行研制的近红外波段空间外差光谱仪,以天空为背景,将加入钾盐的酒精喷灯火焰模拟火箭尾焰作为探测目标开展钾盐光谱的探测与提取研究。测量数据分别采用自回归模型(AR)和非参数模型(MUSIC法)进行处理,结果表明以SHS技术进行强噪声背景的钾盐光谱检测是可行的。

1 探测系统及干涉数据

探测系统为近红外空间外差光谱仪,基本结构如图1所示,光路采用迈克尔逊干涉基本构架,区别在于用反射式衍射光栅替代了两平面镜,光栅法线与光轴成 θ 角。 θ 角的数值决定了探测系统的基频波长,光栅的宽度及CCD尺寸决定了光谱范围,光

栅常数及CCD像元尺寸决定了光谱分辨率。

由于空间外差光谱仪测量数据的波段范围很窄,约为十几个纳米,且选择在目标特征光谱区域探测,接收到的信号包括钾盐光谱、系统噪声及大气背景,干涉图表达式为:

$$I(x) = N(x) + A(x) + \int_{-\infty}^{\infty} B(k) \exp(ikx) dk \quad (1)$$

式中: $N(x)$ 为系统噪声; $A(x)$ 为大气背景; $B(k)$ 为钾盐光谱。因此变换光谱中的钾盐信号将受大气背景与仪器系统噪声影响,需进行信号提取处理。

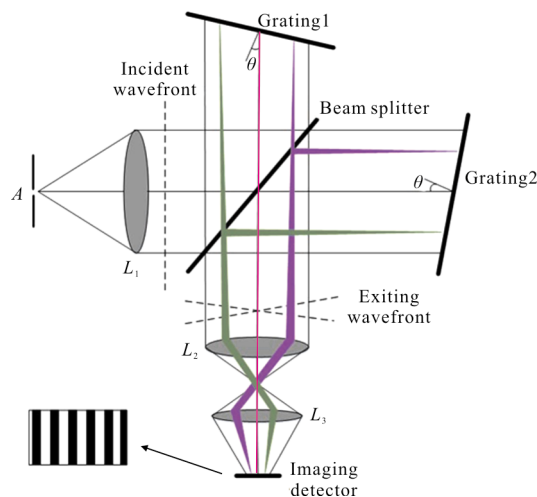


图1 空间外差光谱仪结构图

Fig.1 Schematic diagram of the basic SHS configuration

2 信号提取方法

在对钾盐光谱的提取中,分别采用现代谱估计的自回归AR算法和MUSIC算法对钾线信号进行处理,然后对结果进行分析。

2.1 自回归AR算法

自回归AR算法是基于观测数据的全极点参数模型,通过一定的算法与准则确定模型阶数与参数进而实现信号恢复或提取的方法。当前信号取决于当前输入与过去输出的加权值,算法的基本数学表达式有三个:

$$x(n) = - \sum_{i=1}^p a_i x(n-i) + u(n) \quad (2)$$

$$H(z) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^p a_i z^{-i}} \quad (3)$$

$$P(e^{jw}) = \frac{\sigma^2}{\left| 1 + \sum_{i=1}^p a_i e^{-jwi} \right|^2} \quad (4)$$

式中： $x(n)$ 为干涉数据； $H(z)$ 为传递函数； $P(e^{jw})$ 为信号功率谱； σ 为干涉数据方差； p 为模型阶数； $a_i, i=1, 2, 3, \dots, p$ 为模型参数，在信号的提取中，模型阶数及模型参数的准确估计直接影响结果的准确性。测试中模型阶数与模型参数分别由自回归传递函数准则及相关函数法确定。

2.2 MUSIC 算法

算法原理基于复杂信号系统的自相关矩阵可分解为信号子空间自相关矩阵和噪声子空间自相关矩阵，两类子空间的自相关矩阵满足正交性原则。信号子空间向量 \mathbf{A} 和噪声子空间向量 \mathbf{V}_k 可分别定义为：

$$\mathbf{A} = [1, \exp(jw_1), \dots, \exp(jw_1 p)]^T; i=1, 2, \dots, M \quad (5)$$

$$\mathbf{V}_k = [V_{M+1}, V_{M+2}, \dots, V_{p+1}] \quad (6)$$

式中： M 为干涉图采样数； p 是信号特征向量维数。由于信号子空间与噪声子空间正交，故：

$$e_i^H \left(\sum_{k=M+1}^{p+1} a_k \mathbf{V}_k \right) = 0; i=1, 2, \dots, M \quad (7)$$

公式(7)中假设 $a_k=1$ ，则信号的功率谱可表示为：

$$\hat{P}_M = \frac{1}{e^H(w) \left(\sum_{k=M+1}^{p+1} \mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^H \right) e^H(w)} \quad (8)$$

当 $w=w_i$ 时 \hat{P}_M 有极大值，此时对应信号特征频率分量，这便是 MUSIC 算法的基本原理。与 AR 算法类似，MUSIC 算法也涉及模型阶数 p 的估计，可用准则有 HQ、AIC、MDL、EDC 等。

3 数据处理与分析

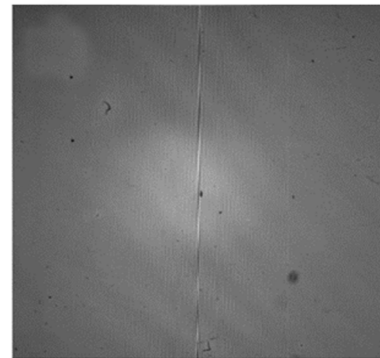
实验使用的数据由自行研制的近红外波段空间外差光谱仪采集，实物如图 2 所示。仪器主要参数如下，波长范围：756.8~771.7 nm；光谱分辨率：0.029 nm；通光口径：小于 30 mm；视场：大于 4°；探测器：CCD47-20AIMO1 024×1 024；像元尺寸：13 μm。以加

入氯化钾的酒精喷灯火焰作为测量目标，酒精喷灯距离光谱仪 200 cm，背景为室外天空。图 3(a)为实际测量的钾盐火焰二维干涉图。理想条件下的干涉图应该是以图像中心列为对称轴左右对称排列，但是由于光路中各光学与电子学器件的缺陷、响应非均匀性及仪器一体化封装过程的误差等因素影响，使干涉图存在一些暗点、左右不严格对称、不同行数据间存在一定的相位偏移等情况。



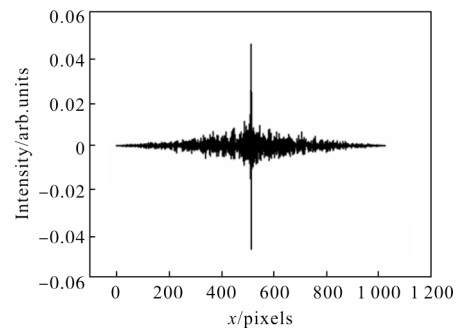
图 2 HEP-765-S 超分辨率干涉光谱仪

Fig.2 HEP-765-S ultra-resolution interference spectrometer



(a) 二维干涉图

(a) 2D interference image



(b) 一维干涉图

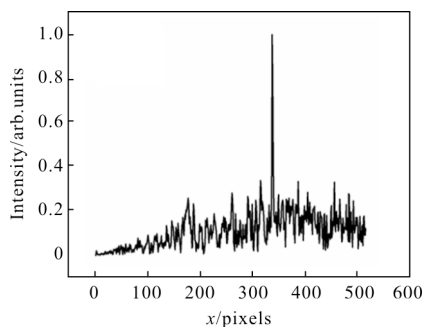
(b) 1D interference image

图 3 实测钾盐干涉图

Fig.3 Measured potassium interference figure

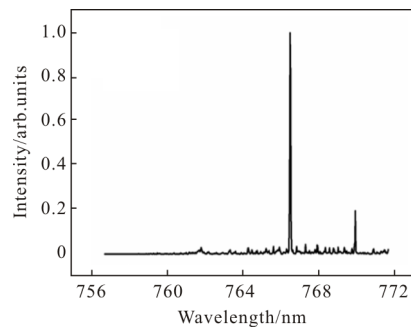
取二维干涉图中间的一行数据, 经过切趾、差分去基线、相位校正预处理后, 获得一维干涉图, 如图 3(b)所示。直接对一维干涉图做傅里叶变换得到包含大气背景及系统噪声的钾盐光谱, 如图 4(a)所示。为了方便比较, 以光谱最大值为基准做了归一化处理。可以看出光谱在像元 335 位置出现一明显尖峰, 其对应钾 766.49 nm 的特征峰, 另外在像元 452 位置还存在另一幅度较小尖峰, 对应钾 769.896 nm 特征峰, 除两特征峰外的其余波段存在一些与钾 769.896 nm 特征峰幅度相当的系统噪声与大气背景影响, 因此对钾盐光谱信号提取的重点应是对 769.896 nm 特征峰的识别与提取。

将预处理的一维干涉图扣除大气背景并滤波扣除随机噪声, 然后分别用 AR 算法和 MUSIC 算法进行光谱信号的提取, 结果如图 4(b)、(c)所示, 经过波长定标, 图 4(b)、(c)的横坐标已经换成波长。可以看出: 两种算法都能在保留钾特征信号的基础上, 对噪声作出抑制, 此外经过处理后的钾特征峰的半峰宽变得更窄。为定量说明两算法对特征峰的改善, 仿真理想的钾光谱如图 5 所示, 以其为标准分别与各光谱进行比较, 结果如表 1 所示。可以看出, AR 算法对钾 766.49 nm 特征峰的半峰宽减小率为 21%, 噪声减小率为 42%; MUSIC 算法对钾线 766.49 nm 特征峰的半峰宽减小率为 50%, 噪声减小率为 47%, 图 6 为 766.49 nm 特征峰半峰宽放大示意图。因此采用现代谱估计的 AR 算法和 MUSIC 算法都能实现对强噪声背景中钾线光谱信号的提取且能改善特征光谱的精细结构, 其中又以 MUSIC 算法的效果更好, 说明以空间外差技术对火焰中钾盐信号的探测与提取是可行的。



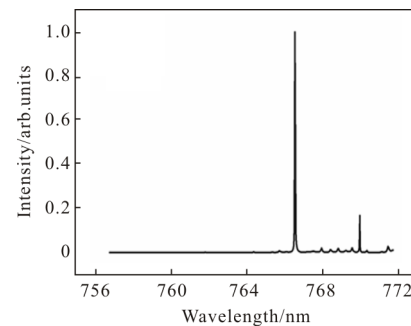
(a) 直接变换光谱

(a) Directly transform spectrum



(b) AR 算法结果

(b) AR algorithm



(c) MUSIC 算法结果

(c) MUSIC algorithm

图 4 实测光谱与 AR 算法、MUSIC 算法结果

Fig.4 Measured spectrum and results of AR and MUSIC algorithms

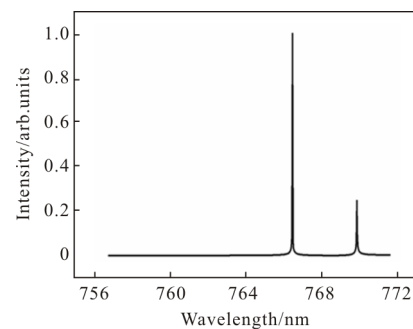


图 5 仿真理想钾盐光谱

Fig.5 Ideal potassium spectrum

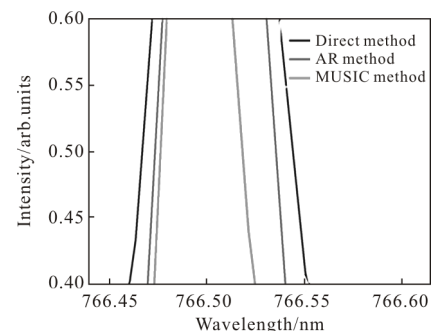


图 6 766.49 nm 半峰宽放大图

Fig.6 Enlarge schematic of half peak width of 766.49 nm

两种算法在对钾特征信号的提取过程中都涉及模型阶数 p 的选取,计算结果对 p 的取值极为敏感,同一个 p 值对不同波长特征峰的提取效果不同,不同的 p 值能够对同一特征峰的位置、半峰宽产生影响。由于测试对象为双波长光谱信号,因此在对 p 值的选取上,首先要根据提取信号的特点,优先考虑对弱信号的影响,选择合适的准则确定 p 值的大概范围,然后在此基础上进行调整,直至获得最佳效果。

表 1 AR 算法与 MUSIC 算法对钾线光谱的改善
Tab.1 Improvement of potassium spectrum by AR algorithm and MUSIC algorithm

Method	Half width/Pixel		Sd/arb.units
	766.49 nm	769.896 nm	
Direct method	2.8	-	0.090
AR method	2.2	0.8	0.052
MUSIC method	1.4	1.3	0.048

4 结 论

火箭推进剂中普遍添加含钾消焰剂以减少尾焰的二次燃烧现象,从而降低尾焰对通信的干扰、提高隐形性。火箭尾焰中钾光谱信号的存在为实现对其探测与追踪提供了新的可能。基于此以酒精喷灯火焰来模拟导弹尾焰,采用空间外差光谱仪进行钾信号的探测。由于采集信号中包含很强的背景与随机噪声,为实现信号识别,分别采用现代谱估计方法中的自回归 AR 算法和 MUSIC 算法对信号进行处理。结果表明,两种算法均能在保持钾信号的基础上实现对噪声的抑制,使特征信号变精细,实现信号提取与识别,说明将空间外差技术作为火箭的探测、识别新手段具有可行性。

另一方面自回归 AR 算法和 MUSIC 算法虽然可以实现对钾信号的提取,但算法中均涉及模型阶数 p 的选取,对结果有很大影响。对于钾这类双峰或多峰信号现有准则不能完全实现 p 的自适应确定,因此研究新的判定准则是后续需要开展的工作。

参考文献:

[1] Paul E D, James D F, Mark D C. Mechanistic model for

aluminum particle ignition and combustion in air[J]. Journal of Propulsion and Power, 2005, 21(3): 478-485.

[2] Tiranov A D, Filippov V L. Calculation the spectral density of the radiant intensity of plume of solid-fuel rocket engines [J]. Journal of Optical Technology, 2012, 79(3): 184-188.

[3] Liu Zunyang, Shao Li, Wang Yafu, et al. The influence of flight parameters on the infrared radiation of a liquid rocket exhaust plume[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0404001. (in Chinese)

[4] Xie Feng, Liu Chengyu, Shao Honglan, et al. Scene-based spectral calibration for thermal infrared hyperspectral data[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46 (1): 0138001. (in Chinese)

[5] Qi Xiaofei, Li Junqiang, Zhang Xiaohong, et al. Influence of energetic potassium salt as eliminated-flame additive on performance of nitramine modified double base propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(3): 334-338. (in Chinese)

[6] Yuan Zongheng, Li Shu, Ye Song, et al. Feasibility analysis of rocket plume detection base on spatial heterodyne spectroscopy [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44 (10): 2867-2873. (in Chinese)

[7] Harlander J M, Roesler F L, Gardon J G, et al. SHIMMER: a spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of earth's middle atmosphere[J]. Applied Optics, 2002, 41(7): 2867-2873.

[8] Mierkiewicz E J, Roesler F L, Harlander J M, et al. First light performance of a near-UV spatial heterodyne spectrometer for interstellar emission line studies [C]//SPIE, 2004, 5492: 751-766.

[9] Englert C R, Stevens M H, Siskind D E, et al. Spatial heterodyne imager for Mesospheric radicals on STPSat-1[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115: 2169-897X.

[10] Englert C R, Harlander J M, Brown C M, et al. Spatial heterodyne spectroscopy at the Naval Research Laboratory[J]. Applied Optics, 2015, 54(31): F158-F163.

[11] Luo Haiyan, Li Shuang, Shi Hailiang, et al. Optical design of imaging system based on spatial heterodyne spectrometer [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8): 0818005. (in Chinese)

[12] Wang Xinqiang, Zhang Lijuan, Xiong wei, et al. Study on Inhomogeneous correction of interference pattern of spatial heterodyne spectrometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 27(4): 1274-1278. (in Chinese)