

## 基于辐射通量表观对比度光谱的红外预警卫星 探测波段选择方法

刘尊洋, 邵立, 汪亚夫, 孙晓泉\*

(电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

**摘要:** 选择合理的探测波段是设计红外预警卫星需要解决的重要问题. 提出了一种基于点目标辐射通量表观对比度光谱确定红外预警卫星探测波段的方法. 论文首先建立了较完善的火箭尾焰表观对比度光谱计算模型, 进一步建模计算了典型液体和固体火箭尾焰在不同高度的红外辐射特性, 使用通用大气辐射传输(CART)软件计算了典型大气条件下的地球/大气背景辐射以及不同高度处大气的透过率和路径辐射, 在此基础上以典型液体和固体火箭为例, 计算了尾焰在不同高度处的辐射通量表观对比度光谱. 结果表明: 不论液体还是固体火箭, 在 $2.55 \sim 2.85 \mu\text{m}$ 和 $4.19 \sim 4.48 \mu\text{m}$ 波段的辐射通量表观对比度都比较大, 红外预警卫星工作波段可以选为上述波段.

**关键词:** 红外预警卫星; 探测波段; 辐射通量表观对比度; 火箭尾焰

中图分类号: TN215 文献标识码: A

## A band selection method for infrared warning satellites based on radiation flux apparent contrast spectrum

LIU Zun-Yang, SHAO Li, WANG Ya-Fu, SUN Xiao-Quan\*

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** The selection of detection band is fundamental to the design of infrared warning satellites. An approach adopting point target radiation flux apparent contrast spectrum to select the detection band was proposed in this paper. A relatively complete model calculating the apparent contrast spectrum of rocket plume was founded at first. Then the infrared radiation spectral characteristics of typical liquid and solid rockets at various altitudes were obtained by modeling and simulating. Finally, the infrared radiation of background and the transmittances and path radiation of atmosphere were calculated using the combined atmospheric radiative transfer(CART). Based on the above results, the apparent contrasts spectral of typical liquid and solid rockets at various altitudes were gained. Results of both liquid and solid rockets show that, the apparent contrast at  $2.55 \sim 2.85 \mu\text{m}$  and  $4.19 \sim 4.48 \mu\text{m}$  are higher than other bands, and might be suitable for the infrared warning satellites detection band chosen by the space based infrared system.

**Key words:** infrared warning satellites, detection band, radiation flux apparent contrast, rocket plume

**PACS:** 95.55. Rg, 95.85. -e

### 引言

选择合理的探测波段, 可以提高红外预警卫星的探测概率, 降低其虚警率; 反之则容易使目标湮没于背景之中. 上世纪60年代, 美国“米达斯”卫星选择 $2.3 \mu\text{m}$ 波段探测导弹, 波段选择不当是其失败的重要原因<sup>[1]</sup>. 因此, 国外后续预警系统采用了更

合理的探测波段, 但并未公布具体的波段范围, 只是宣称在 $2.7 \mu\text{m}$ 和 $4.3 \mu\text{m}$ 波长附近<sup>[2]</sup>.

近年来, 国内针对红外预警卫星的探测波段选择, 开展了一系列的研究. 朱定强等人<sup>[3]</sup>, 许尤福<sup>[4]</sup>、邵立<sup>[5]</sup>等人和李盾等人<sup>[6]</sup>分别从导弹辐射光谱特性、地球/大气背景辐射以及卫星探测器材料组成等方面推断, 分析了红外预警卫星探测波段的确

收稿日期: 2013-05-10, 修回日期: 2013-09-23

基金项目: 国家重点实验室基金项目(10J006)

Foundation items: Supported by Foundation of State Key Laboratory (10J006)

作者简介 (Biography): 刘尊洋(1984-), 男, 博士生, 主要从事红外辐射及光电仿真方面的研究. E-mail: liukp2003@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: sunxq@ustc.com

Received date: 2013-05-10, revised date: 2013-09-23

如国外报道那样工作在  $2.7 \mu\text{m}$  和  $4.3 \mu\text{m}$  附近. 但是由于这些研究方法将目标、背景、探测器等探测要素孤立起来, 缺乏系统性, 因此推导导弹预警卫星探测波段时难免考虑不够全面. 张光明等人<sup>[1]</sup> 首次从系统角度出发, 利用导弹助推段红外探测器的像面照度模型确定了 DSP 预警卫星的探测波段为  $2.60 \sim 2.80 \mu\text{m}$  和  $4.18 \sim 4.45 \mu\text{m}$ . 后续研究基本都是沿袭此从系统角度开展研究的思路. 张伟等人<sup>[7]</sup> 提出使用系统等效目标 (SET) 综合表示背景杂波噪声和探测器电子学噪声对波段选择的影响, 然后以综合信噪比作为目标函数确定了 DSP 预警卫星的最佳工作波段为  $2.73 \sim 2.85 \mu\text{m}$  和  $4.20 \sim 4.43 \mu\text{m}$ . 但是, 上述两个报道仅以其他文献中报道的特定高度处尾焰光谱辐射强度曲线为依据, 而没有考虑不同高度尾焰光谱辐射强度的变化. 另外, 在计算目标信号时, 仅考虑大气的衰减而忽略了大气路径辐射的贡献. 鉴于此, 叶庆等人<sup>[2]</sup> 以视在对比度为目标函数确定 DSP 卫星的最佳工作波段, 计算了尾焰在不同海拔高度的尾焰光谱辐射亮度, 综合考虑了大气的吸收作用和大气路径辐射的增益作用, 最终认为 DSP 预警卫星的最佳探测波段应该为  $2.63 \sim 2.83 \mu\text{m}$  和  $4.18 \sim 4.50 \mu\text{m}$ . 该文考虑了不同高度的尾焰光谱分布以及路径辐射对尾焰视在辐射的贡献, 但选择了亮度对比度作为目标函数. 这一选择对于面目标探测系统而言是合适的, 而红外预警卫星为点目标探测系统, 尾焰的整体辐射强度才是探测系统所接收到的目标信号, 而尾焰各处温度和气体组分分布不同, 其局部区域辐射亮度的光谱分布规律与整个尾焰辐射强度的光谱分布规律并不完全一致, 因此用亮度对比度作为目标函数不一定适用于分析红外预警卫星的探测波段. 另外, 由于尾焰相对探测器张角小于探测器的瞬时视场 (IFOV), 特别是火箭飞行高度较低时, 尾焰尺寸仅为百米量级<sup>[8]</sup>, 对探测器张角远小于探测器 IFOV, 此时就需要考虑 IFOV 内尾焰所占立体角以外背景辐射的贡献<sup>[9]</sup>.

鉴于此, 论文提出一种利用点目标辐射通量表观对比度光谱确定红外预警卫星探测波段的方法, 建立了较完善的火箭尾焰表观对比度光谱计算模型, 在计算目标所在 IFOV 与相邻 IFOV 内的辐射通量表观对比度光谱分布规律时, 考虑了尾焰辐射、IFOV 内填充背景的辐射, 路径辐射对目标所在像元辐射通量的贡献. 基于此模型, 论文研究了液体和固体两种不同燃料的火箭在不同高度处表观对比度光谱分布规律, 为红外预警卫星探测波段的选择提供了参考.

## 1 火箭尾焰点目标辐射通量表观对比度定义

由于尾焰所张立体角小于红外预警卫星的瞬时视场 (IFOV), 故可以视为点目标, 如图 1 所示. 图中,  $d_p$  为尾焰尺寸,  $d$  为单元探测器尺寸,  $\theta$  为尾焰所张立体角, IFOV 为单元探测器瞬时视场.

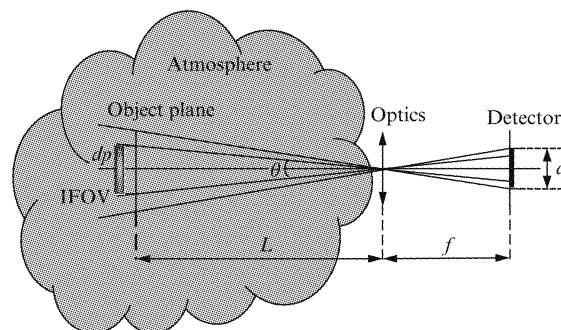


图 1 尾焰辐射大气传输及瞬时视场示意图

Fig. 1 Illustration of plume infrared radiation transfer through atmosphere and IFOV

根据图 1, 由于尾焰尺寸不能充满整个 IFOV, 所以目标所在 IFOV 的辐射通量由三部分组成: 一是来自尾焰辐射经大气衰减后到达像元表面的辐射通量, 二是目标所张立体角内路径辐射在像元表面产生的辐射通量, 三是目标所张立体角外像元 IFOV 内地球大气背景辐射在像元表面产生的辐射通量. 据此, 目标所在 IFOV 内总的辐射通量可以表示为:

$$\Phi_m = I_m \tau_a \frac{S_o}{L_{ms}^2} \tau_o + L_{path} A_m \frac{S_o}{L_{ms}^2} \tau_o + L_B (A_p - A_m) \frac{S_o}{L_{ms}^2} \tau_o \quad (1)$$

式中,  $I_m$  为尾焰辐射强度,  $\tau_a$  为大气透过率,  $S_o$  为光学系统入瞳面积,  $L_{ms}$  为火箭和红外预警卫星之间的距离,  $\tau_o$  为光学系统透过率,  $L_{path}$  为路径的大气路径辐射亮度,  $A_m$  为尾焰在视线方向的投影面积,  $A_p$  为瞬时视场在物方目标所在位置的投影面积,  $A_p = (IFOV \cdot L_{ms})^2$ ,  $L_B$  为地球以及大气背景的辐射亮度, 使用 CART 软件计算, 具体见本文第 3 节.

另一方面, 相邻瞬时视场内接收地球大气背景辐射通量由下式给出:

$$\Phi_B = L_B A_p \frac{S_o}{L_{ms}^2} \tau_o \quad (2)$$

根据对比度定义<sup>[9]</sup>, 尾焰与背景的点目标辐射通量表观对比度 (下文简称表观对比度) 可以表示成:

$$C = \frac{\Phi_m - \Phi_B}{\Phi_B} \quad (3)$$

将式(1)、式(2)代入式(3),可得尾焰与背景的表现对比度计算公式:

$$C = \frac{I_m \tau_a + L_{path} A_m - L_B A_m}{L_B A_p}, \quad (4)$$

表现对比度光谱计算公式为:

$$C_\lambda = \frac{I_{m\lambda} \tau_{a\lambda} + L_{path\lambda} A_m - L_{B\lambda} A_m}{L_{B\lambda} A_p}. \quad (5)$$

## 2 火箭尾焰红外辐射特性的计算

本节仅简要介绍液体和固体火箭尾焰红外辐射特性的计算方法,具体细节参见本文作者前期发表的文章<sup>[10-12]</sup>.使用 FLUENT 软件计算尾焰流场,其中尾焰复燃反应使用有限速率化学反应模型计算,尾焰中气体粒子两相耦合流场使用离散颗粒模型计算,气体辐射参数基于 HITEMP 数据库计算,固体粒子辐射参数使用 MIE 散射理论计算,尾焰内辐射传输方程的求解使用有限体积法完成.假设火箭发动机燃烧室压强为 4.8 MPa,温度为 3 550 K,液体和固体火箭发动机中组分质量分数如表 1 所示,尾焰中复燃反应模型如表 2 所示.

表 1 各组分在喷管出口的质量分数

Table 1 Mass fractions of species at nozzle outlet

Speices	Case1	Case2
H <sub>2</sub> O	0.268	0.155 4
CO <sub>2</sub>	0.221	0.122 4
CO	0.115	0.066 7
H <sub>2</sub>	0.004 06	0.002 4
O <sub>2</sub>	0	0
N <sub>2</sub>	0.103	0.066 1
HCl	0.288	0.167 0
OH	0	0
H	0	0
O	0	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0.42

表 2 尾焰中复燃反应模型

Table 2 Afterburning reaction model in the plume

Reaction formula	Reaction constant
CO + O + M = CO <sub>2</sub> + M	$7 \times 10^{-33} \exp(-2200/T)$
CO + OH = CO <sub>2</sub> + H	$2.8 \times 10^{-17} T^{1.3} \exp(330/T)$
H <sub>2</sub> + OH = H <sub>2</sub> O + H	$1.9 \times 10^{-15} T^{1.3} \exp(-1825/T)$
H <sub>2</sub> + O = OH + H	$3.0 \times 10^{-14} T \exp(-4480/T)$
H + O <sub>2</sub> = OH + O	$2.4 \times 10^{-10} \exp(-8250/T)$
OH + OH = H <sub>2</sub> O + O	$1 \times 10^{-11} \exp(-550/T)$
H + H + M = H <sub>2</sub> + M	$3 \times 10^{-30} T^{-1}$
O + O + M = O <sub>2</sub> + M	$3 \times 10^{-34} \exp(900/T)$
O + H + M = OH + M	$1 \times 10^{-29} T^{-1}$
H + OH + M = H <sub>2</sub> O + M	$1 \times 10^{-25} T^{-2}$

## 3 地球/大气背景特性的计算

地球以及大气背景的辐射亮度  $L_B$  主要由地球大气背景辐射特性、红外辐射大气透过率、以及辐射传输大气路径辐射三部分构成.使用通用大气辐射传输软件(Combined atmospheric radiative transfer, CART)<sup>[13-14]</sup>计算上述参数.仿真条件是:晴空,大陆地区 6 月,能见度 23 km,地表条件为陆地,地表温度为 296 K,观测方位角为 0°,观测天顶角为 180°,太阳天顶角和方位角都为 0°,大气层厚度设为 100 km,考虑大气自身辐射和太阳光多次散射对大气路径辐射的贡献.图 2 为大气层顶探测时地球大气背景辐射光谱分布规律,图 3 为海拔 10 km 高空垂直传输到大气层顶的透过率和大气路径辐射光谱分布规律.

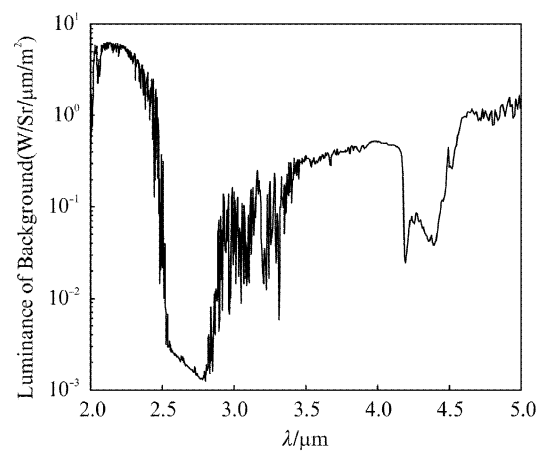


图 2 地球/大气背景红外辐射

Fig. 2 Infrared radiation of geo-atmospheric backgrounds

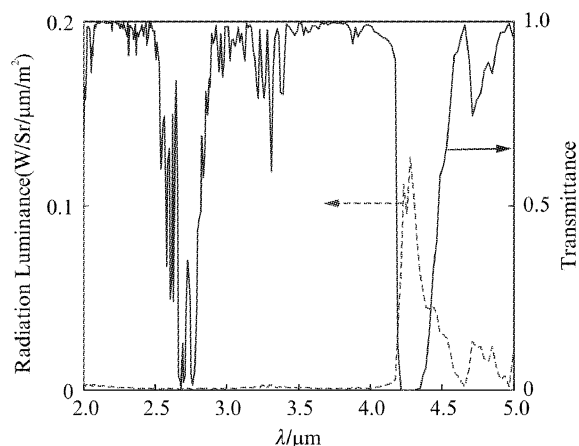


图 3 海拔 10 km 大气透过率及路径辐射

Fig. 3 The transmittance and path radiation at 10 km

#### 4 红外预警卫星探测波段研究

首先考虑瞬时视场对表观对比度光谱的影响,以地球同步轨道探测器为例,轨道高度为 35 860 km,假设火箭位于卫星正下方海拔 20 km 高度,则  $L_{ms} = 35\ 840$  km,图 4 和图 5 为  $(IFOV \times L_{ms})$  尺寸在 1 km 到 4 km 变化时,利用式(5)计算液体和固体火箭尾焰表观对比度光谱变化规律。

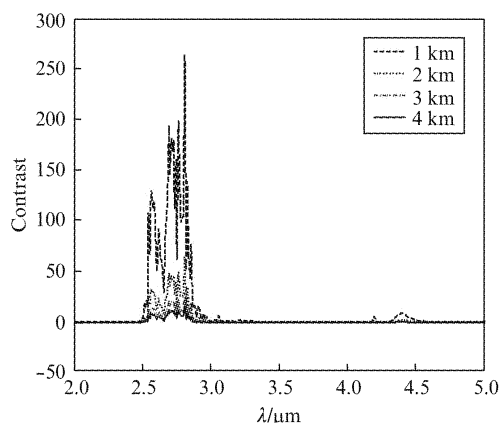


图 4 液体火箭尾焰表观对比度光谱随  $(IFOV \times L_{ms})$  变化关系

Fig. 4 The relationship between apparent contrast and  $(IFOV \times L_{ms})$  of liquid rocket plume

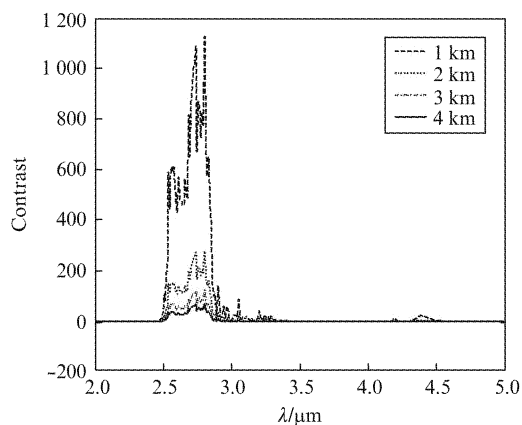


图 5 固体火箭尾焰表观对比度光谱随  $(IFOV \times L_{ms})$  变化关系

Fig. 5 The relationship between apparent contrast and  $(IFOV \times L_{ms})$  of solid rocket plume at 20 km

观察图 4 和图 5 可以发现,IFOV 对表观对比度的幅值影响较大,而对光谱分布规律基本没有影响.故本文选择探测波段时仅以尾焰  $(IFOV \times L_{ms})$  尺寸等于 1 km 为例进行计算.另外,还可以发现不论液体火箭还是固体火箭,在  $2.0\ \mu\text{m}$  到  $5.0\ \mu\text{m}$  之间,表观对比度在  $2.7\ \mu\text{m}$  附近约  $2.5\ \sim\ 3.0\ \mu\text{m}$  和

$4.3\ \mu\text{m}$  附近约  $4.2\ \sim\ 4.5\ \mu\text{m}$  两个波段有较大值,且在前者远大于后者.为了进一步确定探测波段,计算了  $5\ \sim\ 50\ \text{km}$  不同高度处的液体火箭和固体火箭的表观对比度光谱。

图 6 和图 7 为液体和固体火箭在  $2.7\ \mu\text{m}$  和  $4.3\ \mu\text{m}$  两个波段附近的表观对比度光谱。

分析图 6 和图 7 火箭尾焰表观对比度光谱变化规律,可以得出以下结论:

(1) 在  $5\ \text{km}$  到  $50\ \text{km}$  高度范围内,液体火箭  $2.7\ \mu\text{m}$  波段的表观对比度呈先增大后减小且趋于稳定的规律,而  $4.3\ \mu\text{m}$  波段的表观对比度逐渐增大;固体火箭  $2.7\ \mu\text{m}$  和  $4.3\ \mu\text{m}$  波段表观对比度都呈逐渐增大规律。

(2) 在所考察高度范围内,液体和固体火箭在  $2.7\ \mu\text{m}$  波段的表观对比度都始终大于  $4.3\ \mu\text{m}$  波段的表观对比度,且在低空更加明显,据此可以推断,

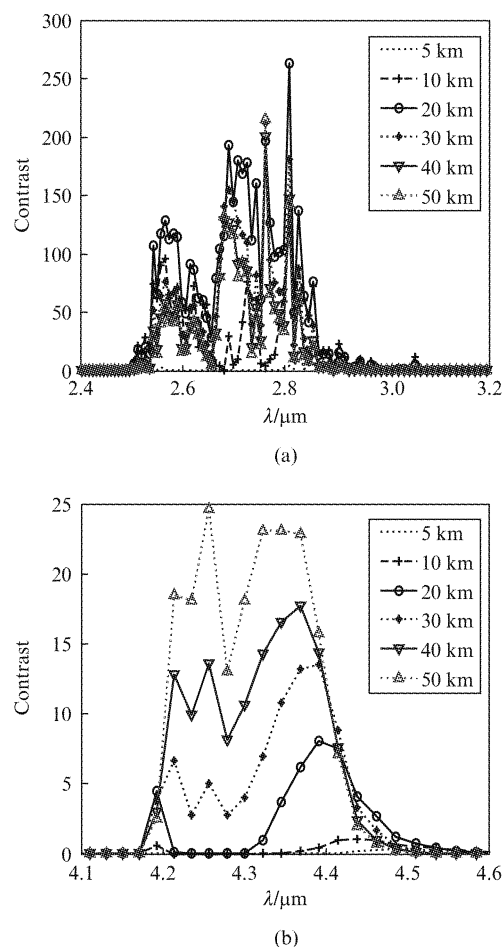


图 6  $5\ \sim\ 50\ \text{km}$  高度处液体火箭表观对比度光谱 (a)  $2.7\ \mu\text{m}$  波段附近, (b)  $4.3\ \mu\text{m}$  波段附近  
Fig. 6 The apparent contrast of liquid rocket at the altitude of  $5\ \text{km} \sim 50\ \text{km}$  (a) around  $2.7\ \mu\text{m}$ , and (b) around  $4.3\ \mu\text{m}$

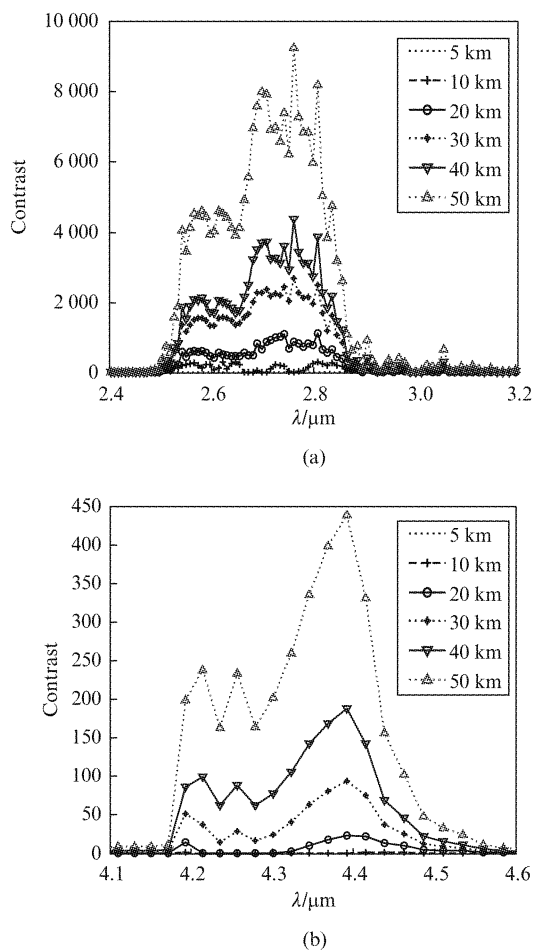


图7 5~50 km 高度处固体火箭表观对比度光谱(a)2.7  $\mu\text{m}$  波段附近, (b)4.3  $\mu\text{m}$  波段附近  
Fig. 7 The apparent contrast of solid rocket at the altitude of 5~50 km (a) around 2.7  $\mu\text{m}$ , and (b) around 4.3  $\mu\text{m}$

2.7  $\mu\text{m}$  波段更适合作为预警波段,且具备在低空探测到火箭尾焰的能力,4.3  $\mu\text{m}$  的低空探测能力较弱,仅适用于高空探测,这一推断与美国新一代红外预警卫星短波波段负责导弹低空探测、中波负责导弹高空探测是一致的<sup>[15]</sup>。

(3)在所考查高度范围内,固体和液体火箭在2.7  $\mu\text{m}$  波段表观对比度的光谱分布规律较为一致,在2.55~2.85  $\mu\text{m}$  波段的表观对比度始终较大,虽然2.75~2.85  $\mu\text{m}$  波段具有更大的表观对比度,但是考虑到卫星探测火箭时,除了背景杂波以外,还有其它干扰源,如探测器噪声、光学系统热噪声等,且2.7  $\mu\text{m}$  波段背景辐射相对较弱,所以为了获取更大的系统信噪比,需要选择尽量宽的探测波段以增大目标的信号强度。据此,本文认为红外预警卫星对火箭尾焰在2.7  $\mu\text{m}$  波段的探测波段可以选择为2.55~2.85  $\mu\text{m}$ 。

(4)4.3  $\mu\text{m}$  附近的表观对比度光谱分布则随高度变化较大,这主要是由于大气对该波段的吸收一直存在,并逐渐减小,导致尾焰视在辐射在4.2~4.3  $\mu\text{m}$  之间由大气吸收造成的凹谷一直存在,并逐渐变浅。考虑4.3  $\mu\text{m}$  波段主要用于探测高空的导弹,在选择探测波段时,参考海拔20 km 以上的表观对比度光谱,结合图6(b)和图7(b)结果,4.3  $\mu\text{m}$  波段的探测波段可以选择为4.19~4.48  $\mu\text{m}$ 。

综合对液体火箭和固体火箭表观对比度的研究结果,本文认为红外预警卫星的探测工作波段可以选为2.55~2.85  $\mu\text{m}$  和4.19~4.48  $\mu\text{m}$ 。另外,仔细观察图6和图7,可以发现表观对比度光谱还有更精细的结构,如果需要选取更窄的探测波段,如1  $\mu\text{m}$  带宽时,可以选择2.75~2.85  $\mu\text{m}$  和4.19~4.48  $\mu\text{m}$  作为探测波段。

## 5 结论

提出了一种利用点目标表观对比度光谱分布规律研究红外预警卫星探测波段的方法,建立了较完善的火箭尾焰表观对比度光谱计算模型,此模型可用于任意已知尾焰红外辐射特性的目标探测波段选择。以典型液体和固体火箭为例,研究了其在5~50 km 高度的表观对比度光谱曲线变化规律,通过综合对液体和固体火箭研究的结果,推断了红外预警卫星的探测波段可以选为2.55~2.85  $\mu\text{m}$  和4.19~4.48  $\mu\text{m}$ 。

仅考虑了背景辐射对表观对比度光谱选择的影响,下一步工作将在综合考虑背景辐射、光学系统热噪声和探测器噪声的基础上,探讨红外预警卫星系统综合信噪比的确定方法,进而研究红外预警卫星对目标的检测概率和虚警概率计算方法,并进一步确定合理的探测带宽。

## References

- [1] ZHANG Guang-Ming, SUN Sheng-Li, ZHANG Wei, et al. Model and application of image plane illumination for the space-based infrared detecting of boost-phase missile [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (张光明,孙胜利,张伟,等. 导弹助推段天基红外探测的像面照度模型及其应用. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(6): 425-428.
- [2] YE Qing, SUN Xiao-Quan, SHAO Li. Analysis of optimum detective wavebands for infrared early-warning satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering* (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*), 2011, 39(3): 389-393.
- [3] ZHU Ding-Qiang, ZHANG Xiao-Ying, XIANG Hong-Jun, et al. Measurement and calculation research of infrared radiation for solid rocket motor plume [J]. *JOURNAL OF AS-*

- TRONAUTICS(朱定强,张小英,向红军,等. 固体火箭发动机喷流红外辐射实验及计算研究. 宇航学报), 2008, **29**(1): 255 - 259.
- [4] XU You-Fu, ZHAO Feng-Sheng, GAO Wen-Hua. Research of atmospheric background radiation simulation [J]. *Infrared and Laser Engineering* (许尤福,赵凤生,高文华. 大气环境背景辐射仿真研究. 红外与激光工程), 2007, **36**(S): 389 - 393.
- [5] SHAO Li, LI Shuang-Gang, SUN Xiao-Quan. Analysis of the missile early warning satellites detecting principle and discussion of attack-defence measure [J]. *Infrared Technology* (邵立,李双刚,孙晓泉. 导弹预警卫星探测原理及其攻防技术探讨. 红外技术), 2006, **28**(1): 43 - 46.
- [6] LI Dun, ZHOU Yi-Yu, LV Tong-Guang. Surveillance and tracking of ballistic missile with space early warning system [J]. *Systems Engineering and Electronics* (李盾,周一宇,吕彤光. 空间预警系统对弹道导弹的监视与跟踪. 系统工程与电子技术), 2002, **24**(3): 52 - 56.
- [7] ZHANG Wei, CAO Yi-Ming, CONG Ming-Yu, et al. Band selection for space-based infrared target detection using background clutter model [J]. *Optics and Precision Engineering* (张伟,曹移明,丛明煜,等. 采用杂波模型进行天基目标红外探测波段的选择. 光学精密工程), 2010, **18**(2): 341 - 348.
- [8] Simmons F S. Rocket exhaust plume phenomenology [M]. EI Segundo, CA: The Aerospace Press and American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000.
- [9] WANG Gang, YU Bing-Xi. Approach to estimate infrared point-target detection range against sky background based on contrast [J]. *Optics and Precision Engineering* (王刚,禹秉熙. 基于对比度的空中红外点目标探测距离估计方法. 光学精密工程), 2002, **10**(3): 276 - 280.
- [10] LIU Zun-Yang, SHAO Li, WANG Ya-Fu, et al. The influence of flight parameters on the infrared radiation of a liquid rocket exhaust plume [J]. *Acta Optica Sinica* (刘尊洋,邵立,汪亚夫,等. 飞行参数对液体火箭尾焰红外辐射特性的影响. 光学学报), 2013, **33**(4): 0404001.
- [11] LIU Zun-Yang, SHAO Li, WANG Ya-Fu, et al. Influence of afterburning on infrared radiation of liquid rocket exhaust plume [J]. *Acta Photonica Sinica* (刘尊洋,邵立,汪亚夫,等. 复燃对液体火箭尾焰红外辐射特性的影响. 光子学报), 2013, **42**(4): 480 - 485.
- [12] LIU Zun-Yang, SHAO Li, WANG Ya-Fu, et al. Influence of afterburning on infrared radiation of solid rocket exhaust plume [J]. *Acta Optica Sinica* (刘尊洋,邵立,汪亚夫,等. 复燃对固体火箭尾焰红外辐射特性的影响. 光学学报), 2013, **33**(6): 0604001.
- [13] Chen X, We H, Yang P, et al. An efficient method for computing atmospheric radiances in clear-sky and cloudy conditions [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. 2011, **112**(1): 109 - 118.
- [14] WEI He-Li, CHEN Xiu-Hong, RAO Rui-Zhong. Introduction to the Combined Atmospheric Radiative Transfer Software CART [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics* (魏合理,陈秀红,饶瑞中. 通用大气辐射传输软件 CART 介绍. 大气与环境光学学报). 2007, **2**(6): 446 - 450.
- [15] Slattery J E, Cooley P R. Space-Based Infrared Satellite System (SBIRS) Requirements Management [C]. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 1998: 223 - 232.