

# 基于综合信噪比的红外预警卫星窄带探测波段选择

苑智玮 黄树彩 熊志刚 唐意东

空军工程大学防空反导学院, 陕西 西安 710051

**摘要** 在宽带探测模型的基础上,综合考虑光谱精细度以及数据量,融合窄带光谱信息进行目标识别,提出一种基于综合信噪比的红外预警卫星窄带探测波段选择方法。依据预警卫星窄带成像机理加入窄带滤光片,综合考虑目标和背景辐射、暗电流噪声以及探测器仪器热噪声等的影响,提出较为完备的综合信噪比计算模型。以国防支援计划(DSP)预警卫星为例,选取中心波长在 2.726, 2.835, 3.012, 4.339  $\mu\text{m}$  处带宽为 10 nm 的窄带波段为探测波段,计算了尾焰在不同高度下的综合信噪比光谱。

**关键词** 探测器; 红外预警卫星; 探测波段; 综合信噪比; 目标识别

中图分类号 V19 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.090401

## Narrowband Detection Waveband Selection for Infrared Warning Satellites Based on Synthetic Signal-to-Noise Ratio

Yuan Zhiwei Huang Shucui Xiong Zhigang Tang Yidong

*Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China*

**Abstract** Based on the wideband detection model, the accuracy and the volumes of spectral data combined with the narrowband information are applied in targets recognition, and then a new method to select the narrow detection waveband of infrared warning satellites based on synthetic signal-to-noise ratio is proposed. According to the narrowband imaging principle of warning satellites, a narrowband filter is added in the imaging system. The radiance from target and background, the dark current noise as well as the thermal noise from detector are considered, and then a new complete model for calculating synthetic signal-to-noise ratio is proposed. Taking the defense support program(DSP) satellite as an example, the central waveband of 2.726, 2.835, 3.012, 4.339  $\mu\text{m}$  with the detection bandwidth of 10 nm, as detection waveband, is selected to calculate the synthetic signal-to-noise ratio spectra of tail at various altitudes.

**Key words** detector; infrared warning satellites; detection waveband; synthetic signal-to-noise ratio; target recognition

**OCIS codes** 040.3060; 280.2470; 300.3700; 300.6340

## 1 引言

在天基弹道目标观测中,由于探测距离远,目标在探测器上仅表现为点目标,包括目标的位置和灰度信息,如此有限的信息量使得点目标特征提取与识别成为一个棘手的问题<sup>[1]</sup>。传统研究方法多基于目标亮度特性进行目标特征的提取与识别<sup>[2-3]</sup>,其原理是将观测结果与数据库中一定大小和状态的仿真结果进行匹配,从而确定探测目标的大小和状态等特征。这种方法需要建立一定数量规模的目标亮度特性数据库,此外,仅依赖目标的空间和时间特征信息进行判别,在远距离探测中往往无法有效提取特征信息。

代表物质内在属性差异的光谱特性可作为目标识别的一种重要手段<sup>[4]</sup>。不同型号导弹的尾焰光谱因发

收稿日期: 2016-05-09; 收到修改稿日期: 2016-05-20; 网络出版日期: 2016-08-29

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2012JM8020)、航空科学基金(20130196004)

作者简介: 苑智玮(1993—),男,硕士研究生,主要从事红外目标检测与识别方面的研究。

E-mail: YuanzhiweiSachiel@163.com

导师简介: 黄树彩(1967—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事模式识别方面的研究。E-mail: hsc67118@126.com

动机、发动机所用循环、燃料添加剂、运行条件以及环境的差异而有很大差别。与空间和时间特征信息不同,光谱信息是物质的本质属性,具有类似“指纹”特征的唯一性、独立性和稳定性特点,因而代表导弹尾焰物质成分固有属性的红外光谱特征信息可以作为主动段弹道目标检测与类型识别的一种重要手段。在目前的弹道导弹防御系统中,目标的光谱信息已应用于红外预警卫星的目标检测<sup>[5]</sup>,在合理的探测波段下可以快速、有效地探测出目标,从而为后续的反导拦截作战提供充足的预警时间和精确的引导信息。当前,国外学者对预警系统探测波段的研究成果尚未公开具体数值,仅透露是在  $2.7 \mu\text{m}$  和  $4.3 \mu\text{m}$  附近<sup>[6]</sup>。国内学者也对此做了深入的研究,张光明等<sup>[7]</sup>采用红外探测器的像面照度模型确定探测波段为  $2.60 \sim 2.80 \mu\text{m}$  和  $4.18 \sim 4.45 \mu\text{m}$  时效果较好。张伟等<sup>[8]</sup>采用系统等效目标(SET)表征背景杂波噪声和探测器电子学噪声对波段选择的影响,以信噪比作为目标函数确定了国防支援计划(DSP)预警卫星的最佳工作波段为  $2.73 \sim 2.85 \mu\text{m}$  和  $4.20 \sim 4.43 \mu\text{m}$ 。但这两篇文献均未考虑尾焰光谱辐射强度随高度的变化,且后者的信噪比设定中未考虑除光子噪声以外的其余探测器噪声。刘尊洋等<sup>[9]</sup>计算了不同高度尾焰辐射通量表观对比度光谱,以此确定了探测波段为  $2.55 \sim 2.85 \mu\text{m}$  和  $4.19 \sim 4.48 \mu\text{m}$ ,但其仅考虑背景辐射对表观对比度光谱的影响,同样未能综合探测器噪声等其他探测要素。此外,宽谱带范围内目标辐射强度变化剧烈,并非一直处于较高水平,因此,为实现稳定探测,研究窄带探测光谱十分必要。

为充分利用尾焰光谱信息,使其在实现目标探测的基础上进一步满足识别需要,需使提取的尾焰光谱满足如下条件:

- 1) 光谱结构足够精细。分辨率较低的光谱结构无法对不同物质成分的光谱线特征(谱线位置、谱线强度和谱线线型等)进行有效区分和提取,势必会影响光谱识别的精度。
- 2) 光谱图像数据量的要小。由于导弹尾焰探测只是针对  $2.7 \mu\text{m}$  和  $4.3 \mu\text{m}$  附近谱段,无需对全谱段进行处理,所以光谱图像的数据量要适中。

随着窄带滤光技术的实现<sup>[10]</sup>,上述两项条件均可通过窄带滤光的方法来满足。窄带滤光提取复杂背景杂散光谱中导弹尾焰的窄带线状光谱,使得基于窄带光谱特性的目标检测与识别成为可能。

鉴于对红外预警卫星窄带探测波段选取方法的需求,提出了一种基于综合信噪比的红外预警卫星窄带探测波段选取方法。该方法综合考虑不同高度下的尾焰红外辐射、地球/大气背景辐射以及探测器噪声等探测要素,建立了较为完备的综合信噪比计算模型。基于此模型,计算了某型导弹在不同高度下的综合信噪比光谱,结合窄带探测技术以及目标检测概率和虚警概率的要求,选择出若干适用于红外预警卫星探测的窄带波段。

## 2 综合信噪比计算模型

红外预警卫星窄带成像系统如图 1 所示,尾焰红外辐射以及地球/大气背景辐射经望远系统和后光学系统到达窄带滤光片,获得确定带宽的窄带波段信号,通过一系列光电转换被探测器接收,完成整个窄带成像过程。

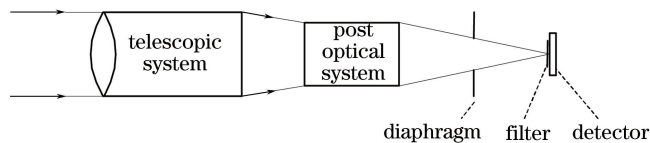


图 1 窄带成像系统示意图

Fig. 1 Diagram of narrowband imaging system

计算信噪比可选用比探测率( $D^*$ )法和电子数法<sup>[11]</sup>,由于后者可以全面准确地反映探测性能参数对综合信噪比的影响,故采用此方法分别计算综合信噪比所需的各探测要素的电子数。

### 2.1 目标电子数

导弹主动段尾焰的长度可达到百米级<sup>[12]</sup>,但由于对尾焰进行探测的红外预警卫星处于天基平台,探测距离较远,故尾焰在探测器焦平面上仅表现为点目标,其产生的电子数为

$$N_t = \frac{A_0 \tau_0 t_{\text{int}}}{hc} \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} \frac{I_t(\lambda) \cos \theta}{R^2} \lambda \tau_a \eta d\lambda, \quad (1)$$

式中  $A_0$  为光学系统入瞳面积,  $\tau_0$  为光学系统透射率,  $t_{\text{int}}$  为积分时间,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为真空中的光速,  $\lambda_0$  为探测中心波长,  $\Delta\lambda$  为光谱带宽,  $I_t(\lambda)$  为尾焰目标辐射强度,  $\theta$  为辐射方向与喷焰中心轴线的夹角,  $R$  为探测距离,  $\eta$  为量子效率,  $\tau_a$  为大气透射率。

## 2.2 地球/大气背景电子数

地球/大气背景在探测器像平面上表现为面目标,产生的电子数为

$$N_b = \frac{A_0 A_d \tau_0 t_{\text{int}}}{4hc f^2} \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} L_b \lambda \tau_a \eta d\lambda, \quad (2)$$

式中  $A_d$  为像元面积,  $f$  为光学系统有效焦距,  $L_b$  为地球/大气背景辐射亮度。

## 2.3 暗电流电子数

利用双采样技术可消除固定噪声,此时系统噪声主要包括光子噪声和读出噪声两部分。暗电流电子和信号电子都会产生光子噪声。其中暗电流是由一定温度的探测器在无信号输入时电子无规则热运动产生的,暗电流噪声电子数为

$$N_{\text{dark}} = \frac{I_{\text{dark}} \cdot t_{\text{int}}}{q}, \quad (3)$$

式中  $I_{\text{dark}}$  为暗电流,  $q$  为电子数。

## 2.4 仪器热噪声电子数

散粒噪声主要是由于光子随机入射导致光生电子的随机产生而形成的。入射光子数满足玻色-爱因斯坦统计分布,在大量光子入射时满足泊松分布,均值与方差相等,因此有

$$n_{\text{shot}} = \sqrt{N_t + N_b + N_{\text{dark}} + N_{\text{et}}}, \quad (4)$$

式中  $n_{\text{shot}}$  为散粒噪声,  $N_{\text{et}}$  为滤光器仪器热噪声电子数,可表示为

$$N_{\text{et}} = \frac{\epsilon_1 \tau_1 A_d \eta t_{\text{int}}}{4F^2 hc} \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda k T_0}\right) - 1 \right]^{-1} \lambda d\lambda, \quad (5)$$

其中  $F$  为光学系统  $F$  数,  $\epsilon_1$  为仪器表面比辐射率,  $\tau_1$  为后光学系统透射率,  $k$  为玻尔兹曼常量,  $T_0$  为仪器表面温度。

探测器接收到的总的噪声电子数为

$$\bar{n} = \sqrt{N_t + N_b + N_{\text{dark}} + N_{\text{et}} + n_{\text{read}}^2}, \quad (6)$$

式中  $n_{\text{read}}$  为读出噪声,它描述了焦面电子经电流放大再经模数转换器(AD)转换这一过程后的电子学噪声。

综上所述,求目标电子数与总噪声电子数之比可得系统综合信噪比:

$$R_{\text{SN}} = \frac{N_t}{\bar{n}} = \frac{N_t}{\sqrt{N_t + N_b + N_{\text{dark}} + N_{\text{et}} + n_{\text{read}}^2}}. \quad (7)$$

## 3 综合信噪比参数设定

### 3.1 尾焰红外辐射特性

尾焰辐射的真实数据难以获取,目前学者们计算尾焰辐射时多采用建模与仿真的方法<sup>[13]</sup>。导弹尾焰流场中高温气体分子的光谱辐射特性主要与温度、压强和粒子辐射等因素有关,这些环境因素只是通过改变气体中分子数的密度而间接改变谱线强度,而谱线中心波长位置和线型变化非常小,几乎保持不变。因此,本文从高温气体数据库(HITEMP)中提取的尾焰气体光谱辐射数据近似计算尾焰红外辐射光谱曲线,气体成分考虑  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  两种主要辐射气体<sup>[14]</sup>。将归一化的光谱辐射数据按文献<sup>[15]</sup>中目标辐射强度随高度变化的量纲进行设定,形成如图 2 所示的在不同高度处的尾焰目标红外辐射光谱,其光谱线型及分布规律与文献<sup>[16]</sup>较为吻合,谱线在  $2.7 \mu\text{m}$  和  $4.3 \mu\text{m}$  附近出现明显峰值。

### 3.2 地球/大气背景辐射特性和大气透射率

当前,计算辐射特性的应用软件功能已十分全面,可直接提取需要的数据。本文需要计算的是  $2\sim 5 \mu\text{m}$  这一较宽波段的综合信噪比。运行图形操作界面 PcModwin 软件可直接调用光谱分辨率大气辐射传输模式

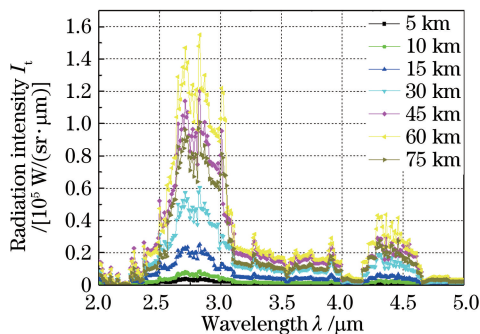


图2 不同高度下的尾焰目标红外辐射光谱

Fig. 2 Infrared radiation spectra of plume target at various altitudes

MODTRAN 中的数据库,其中参数设定如下:大气模式为 1976 年美国标准大气,乡村气溶胶模型,标准卷云模式,云高为 10 km,云厚为 2 km,地表温度为 296 K,太阳天顶角、方位角均为  $0^\circ$ ,时间为第一年的第一天。设置不同的观测高度,得出不同高度下的地球/大气背景辐射,其中 10 km 高度处的地球/大气背景辐射如图 3 所示,可以看出背景辐射强度相较于目标辐射处于较低水平。

同时,大气透射率也可以使用该软件计算,基本条件设定与上述条件相同,获得不同观测高度下的大气透射率,如图 4 所示。可以看出,在  $2.7 \mu\text{m}$  和  $4.3 \mu\text{m}$  附近,大气对红外辐射的吸收能力较强,表现为此处的大气透射率低,且随着高度的降低,这种趋势表现得更为明显。

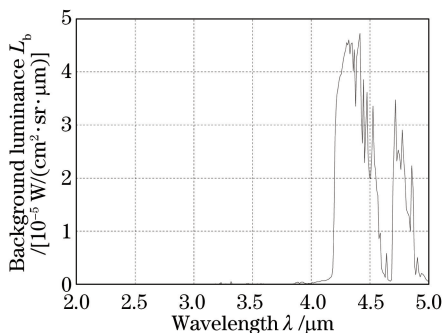


图3 10 km 高度下的地球/大气背景红外辐射

Fig. 3 Infrared radiation of geo-atmospheric backgrounds at 10 km altitude

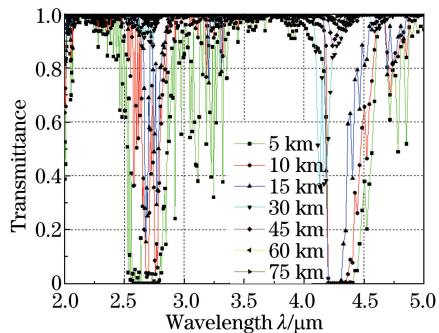


图4 不同高度处大气透射率

Fig. 4 Atmospheric transmittance at various altitudes

#### 4 综合信噪比计算与探测波段选择

为合理计算 DSP 卫星探测器综合信噪比,参考现有的公开文献中的参数设定<sup>[17-18]</sup>,其中  $n_{\text{read}}$  和  $I_{\text{dark}}$  沿用文献[19-20],计算探测器综合信噪比所需的具体参数如表 1 所示。

结合表 1 所列参数和 (7) 式可计算综合信噪比,得出不同波段不同高度下的综合信噪比数值。以 1 nm 步长绘制综合信噪比随波长变化曲线,即综合信噪比光谱,由此可直观地分析选择最佳探测波段。首先比较导弹在 5 km 和 10 km 高度处的综合信噪比,此时的导弹位于云层下方,综合信噪比光谱如图 5 所示。

由图 5 可见,在  $2.7 \mu\text{m}$  和  $4.3 \mu\text{m}$  的右侧位置处综合信噪比数值较大,这是由于低空大气在此波段处透射率低,故探测器只能获取少量目标信号。若战术上设定检测概率  $P_d \geq 99\%$ ,虚警概率  $P_{fa} \leq 10^{-3}$ ,此时获得的综合信噪比数值仅能满足单帧信噪比最低要求<sup>[21]</sup>。

为研究适用于预警卫星观测的精确窄带探测波段,继续讨论位于云层之上的 15~75 km 处的综合信噪比。图 6 为窄带探测器接收到的不同高度下导弹尾焰综合信噪比光谱曲线。

表 1 探测器参数

Table 1 Parameters of detector

Parameter of detector	Value
Distance $R$ /km	40000
Pixel size / $\mu\text{m}^2$	$30 \times 30$
Focal length $f$ /m	1
Aperture $D$ /m	0.9
Transmittance of optical system $\tau_0$	0.6
Band width $\Delta\lambda$ /nm	1
Integral time $t_{\text{int}}$ /ms	0.7
Quantum efficiency $\eta$	0.6
Surface temperature of the filter $T_0$ /K	400
Dark current $I_{\text{dark}}$ /nA	$1.0 \times 10^{-3}$
Surface emissivity of the filter $\varepsilon_1$	0.1
Transmittance of post optical system $\tau_0$	0.75
Read noise $n_{\text{read}}$ /e	560

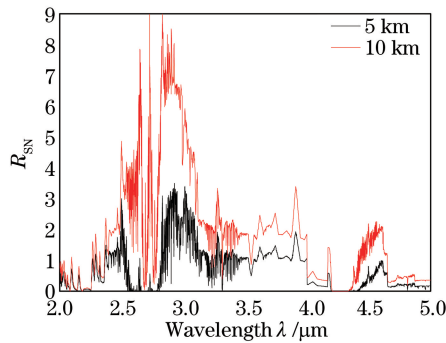
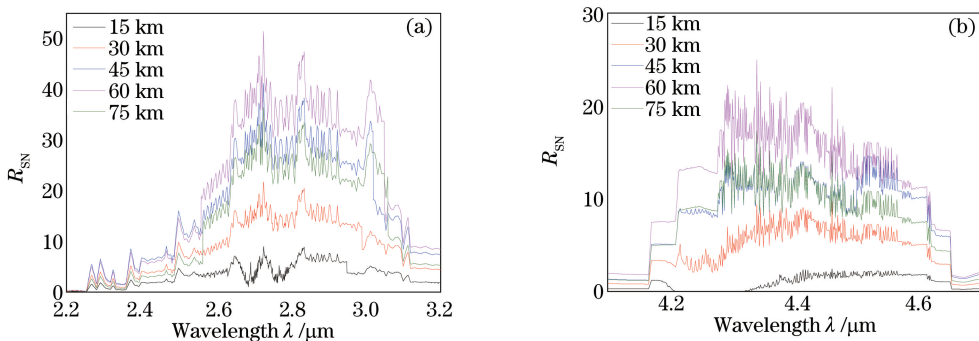


图 5 5 km 和 10 km 高度处综合信噪比光谱

Fig. 5 Synthetic signal-to-noise ratio spectra at altitudes of 5 km and 10 km

图 6 不同高度处综合信噪比光谱。(a) 2.7  $\mu\text{m}$  附近 15~75 km 处综合信噪比光谱;(b) 4.3  $\mu\text{m}$  附近 15~75 km 处综合信噪比光谱Fig. 6 Synthetic signal-to-noise ratio spectra at various altitudes. (a) Synthetic signal-to-noise ratio spectra at altitudes from 15 km to 75 km around 2.7  $\mu\text{m}$ ; (b) synthetic signal-to-noise ratio spectra at altitudes from 15 km to 75 km around 4.3  $\mu\text{m}$ 

分析图 6 中曲线的变化规律可以得出:

1) 尾焰的综合信噪比光谱随高度变化明显,整体上表现为先增大后减小的变化趋势。当目标飞行高度逐渐增大时,综合信噪比呈上升趋势,当达到 65 km 以后,受导弹尾焰复燃结束的影响<sup>[15]</sup>,综合信噪比开始减小。

2) 2.7  $\mu\text{m}$  和 4.3  $\mu\text{m}$  处的综合信噪比光谱具有较大数值,且等高度条件下 2.7  $\mu\text{m}$  处的综合信噪比始终大于 4.3  $\mu\text{m}$  处。2.7  $\mu\text{m}$  波段在低空探测能力较好,适合作为预警波段;4.3  $\mu\text{m}$  处的低空综合信噪比低,仅适用于高空探测,与文献[22]中提到的美国新一代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的观点一致。

3) 考察  $2.7 \mu\text{m}$  附近不同高度的综合信噪比,  $2.6 \sim 3.1 \mu\text{m}$  处具有较大数值, 且在所考察高度范围内光谱线型表现出一定的相似性, 依据峰值出现的位置选择若干窄带探测波段。综合不同高度下的光谱, 选取的探测波段中心波长为  $2.726, 2.835, 3.012 \mu\text{m}$ 。

4)  $4.3 \mu\text{m}$  附近的综合信噪比随高度变化更为明显, 且低空位置的光谱曲线受低空大气低透射率的影响, 其线型与高空位置的相比具有较大差异。由于  $4.3 \mu\text{m}$  波段主要用于高空探测, 因此相比于云层附近的综合信噪比, 目标在较高位置处的数值较大, 更有利于探测。考虑到这一因素, 在分析  $2.7 \mu\text{m}$  附近的综合信噪比光谱时以高空位置的光谱曲线为主, 选取的探测波段中心波长为  $4.339 \mu\text{m}$ 。

综合窄带探测器综合信噪比的研究结果, 红外预警卫星的探测工作波段可以选为中心波长在  $2.726, 2.835, 3.012, 4.339 \mu\text{m}$  的窄带宽波段。在实际运用中, 可根据窄带探测器所能实现的滤光能力适当调整带宽, 但应用本文模型确定的探测中心波长基本保持不变。

## 5 结 论

探测波段的选择是影响预警卫星探测能力的重要因素, 选择合理的窄带探测波段可使预警卫星快速、准确地探测并识别出目标, 提升导弹防御系统的作战能力。为此, 提出了运用综合信噪比分析红外预警卫星最佳窄带探测波段的方法, 建立了较为完备的综合信噪比计算模型。以公开文献中某型号导弹为例, 利用光谱发射和吸收特性谱线近似仿真了其在不同高度下的尾焰红外辐射特性, 通过对绘制的综合信噪比光谱的分析, 最终确定了红外预警卫星最佳窄带探测波段中心波长为  $2.726, 2.835, 3.012, 4.339 \mu\text{m}$ 。

本文研究时目标辐射数据仅以一类固体燃料为例, 下一步工作中继续探究不同型号导弹尾焰红外辐射特性, 建立完备的目标辐射模型, 着眼于预警卫星对弹道目标探测与识别的实际需要, 分析所选择窄带宽探测波段内的特征信息, 为后续进行基于尾焰特征光谱的目标类型识别做好充分准备。

## 参 考 文 献

- 1 Sun Chengming, Zhao Fei, Yuan Yan. Feature extraction and recognition of non-resolved space object from space-based spectral data[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(3): 034202.  
孙成明, 赵 飞, 袁 艳. 基于光谱的天基空间点目标特征提取与识别[J]. 物理学报, 2015, 64(3): 034202.
- 2 Diao Huafei, Li Zhi. Research on the identification of geosynchronous objects with space-based visible surveillance data [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2010, 21(5): 55-59.  
刁华飞, 李 智. 基于天基光学探测信息的 GEO 目标识别研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2010, 21(5): 55-59.
- 3 Tang Yijun, Jiang Xiaojun, Lu Xiaomeng, et al. Analysis of photometric characteristics of medium and high apogee satellites based on light-reflection model[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 763-767.  
唐轶峻, 姜晓军, 卢晓猛, 等. 利用光照反射模型分析中高轨人造卫星测光特性[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 763-767.
- 4 Cao Lelin, Wu Chunfeng, Hou Qingyu, et al. Survey of target recognition technology based on spectrum imaging [J]. Optical Technique, 2010, 36(1): 145-150.  
操乐林, 武春风, 侯晴宇, 等. 基于光谱成像的目标识别技术综述[J]. 光学技术, 2010, 36(1): 145-150.
- 5 Watson J, Zondervan K. The missile defense agency's space tracking and surveillance system[C]. SPIE, 2008, 7106: 710617.
- 6 Ludwig C B, Malkmus W, Reardon J E, et al. Handbook of infrared radiation from combustion gases[A]. NASA-SP-3080, 1973.
- 7 Zhang Guangming, Sun Shengli, Zhang Wei, et al. Model and application of image plane illumination for the space-based infrared detecting of boost-phase missile[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007, 26(6): 425-428.  
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[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(6): 425-428.
- 8 Zhang Wei, Cao Yiming, Cong Mingyu, et al. Band selection for space-based infrared target detection using background clutter model[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(2): 341-348.  
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[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 341-348.

- 9 Liu Zunyang, Shao Li, Wang Yafu, *et al.* A band selection method for infrared warning satellites based on radiation flux apparent contrast spectrum[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2014, 33(5): 492-497.  
刘尊洋, 邵立, 汪亚夫, 等. 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[J]. *红外与毫米波学报*, 2014, 33(5): 492-497.
- 10 Wang Feng, Hu Xiaoyang, Ye Yidong. Development of ultra-narrow band filter technique[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(6): 62-67.  
王锋, 胡晓阳, 叶一东. 超窄带滤光技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(6): 62-67.
- 11 Cao Yiming, Zhang Wei, Cong Mingyu. Analysis of signal-to-noise ratio calculation for satellite-based infrared staring sensor[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(4): 191-195.  
曹移明, 张伟, 丛明煜. 星载红外凝视相机信噪比计算分析[J]. *宇航学报*, 2007, 28(4): 191-195.
- 12 Simmons F S. *Rocket exhaust plume phenomenology*[M]. EI Segundo, CA: The Aerospace Press and American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000.
- 13 Zhang Shukun, Cai Jing, Yang Yongjun. Simulation of infrared radiation characteristics of the exhaust plume by using backward Monte Carlo method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2604-2609.  
张术坤, 蔡静, 杨永军. 尾焰红外辐射特性的反向蒙特卡罗法模拟[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2604-2609.
- 14 Liu Zunyang, Shao Li, Wang Yafu, *et al.* Influence on after burning on infrared radiation of solid rocket exhaust plume[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0604001.  
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[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0604001.
- 15 Ye Q, Sun X Q, Zhang Y J, *et al.* Modeling and simulation of infrared radiation from rocket plume at boosting stage[C]. *SPIE*, 2009, 7383: 738318.
- 16 Liu Zunyang, Shao Li, Wang Yafu, *et al.* Influence on after burning on infrared radiation of solid rocket exhaust plume[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0604001.  
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[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0604001.
- 17 Andreas N S. Space-based infrared system (SBIRS) system of systems[C]. *Proceedings of IEEE Aerospace Conference*, 1997, 4: 429-438.
- 18 Xu Yanke, Yang Yan, Jing Zhanrong, *et al.* Analysis of how U.S defense support program (DSP) satellites to select the right waveband[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(4): 202-204.  
徐琰珂, 羊彦, 景占荣, 等. 美国国防支援计划卫星探测波段的选择分析[J]. *红外技术*, 2009, 31(4): 202-204.
- 19 Kirby B J, Hanson R K. Dual-camera infrared PLIF imaging of CO and CO<sub>2</sub>[C]. *38th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2000, 640: 1-8.
- 20 Destefanis G, Audebert P, Mottin E, *et al.* LWIR 256×256 HgCdTe focal plane array operating at 88 K[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1998, 184-185: 1288-1292.
- 21 Zhong Yu, Wu Xiaoyan, Huang Shucai, *et al.* Detection ability of infrared early warning satellite for ballistic missile in boost phase[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3276-3281.  
钟宇, 吴晓燕, 黄树彩, 等. 红外预警卫星弹道导弹主动段探测能力[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(11): 3276-3281.
- 22 Slattery J E, Cooley P R. Space-based infrared satellite system (SBIRS) requirements management[C]. *Proceedings of IEEE Aerospace Conference*, 1998, 5: 223-232.