

## 红外预警卫星直视地表波段选择及探测能力

刘尊洋, 叶庆, 李修和, 邵立, 孙晓泉

(国防科技大学 电子对抗学院, 安徽 合肥 230037)

**摘要:** 建立了红外预警卫星直视地表(See-To-Ground, STG)波段探测能力计算模型, 并仿真研究了 STG 最佳探测波段范围以及该波段在导弹预警中可能具备的能力。首先建立了固体、液体导弹尾焰红外辐射模型、地球/大气环境特性模型、点目标辐射通量表观对比度模型、预警卫星系统噪声模型和最低探测高度模型; 其次, 利用上述模型分析了固体和液体导弹尾焰的表观对比光谱分布规律, 认为将 STG 波段选定为 2.86~3.0  $\mu\text{m}$  最具合理性; 然后, 通过分析液体和固体导弹尾焰在该波段的表观对比度光谱随高度的变化规律, 初步探讨了 STG 波段的导弹探测能力; 最后, 通过分析不同条件下预警卫星对导弹的首次探测高度, 系统研究了 SBIRS-GEO 预警卫星在 STG 波段的探测能力。研究结果表明: STG 波段对固体导弹则具有较强的早期预警能力, 而对液体导弹的早期预警能力则相对较弱。

**关键词:** 红外预警卫星; 直视地表波段; 仿真; 波段范围; 探测能力

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0204003

## Choice and detectability of See-To-Ground waveband of infrared warning satellite

Liu Zunyang, Ye Qing, Li Xiuhe, Shao Li, Sun Xiaoquan

(Institute of Electronic Countermeasure, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

**Abstract:** The detectability of See-To-Ground (STG) wavebands of the infrared warning satellite computational models were constructed, and the possible wavebands range and the role of this STG waveband in missile early warning system were studied by simulation on the basis of those models. Firstly, a series of models for the infrared radiation model of solid and liquid rocket plume, the atmospheric background radiation, the point target radiation flux apparent contrast spectrum, the system noise and the lowest detection height were established. Secondly, the apparent contrast spectrum of solid and liquid rockets plume were analyzed and the STG band was deemed to be 2.86–3.0  $\mu\text{m}$ . Thirdly, the detection ability was preliminarily investigated based on the analysis of the rule by which the apparent contrast spectrum of solid and liquid rockets plume varied according to the height. Finally, the detectability of SBIRS-GEO warning satellite at STG band was studied thoroughly, based on the analysis of the first detection height under different condition. The research shows that the STG band possesses superior early warning ability to solid rockets, and weaker early warning ability to liquid rockets.

**Key words:** infrared warning satellite; See-To-Ground waveband; simulation; waveband range; detectability

收稿日期: 2017-08-20; 修订日期: 2017-10-29

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金(SKL2015ZR01)

作者简介: 刘尊洋(1984-), 男, 讲师, 博士, 主要从事电磁建模仿真方面的研究。Email: liukp2003@163.com

## 0 引言

天基红外系统 (Space Based Infrared Systems, SBIRS) 预警卫星是美军为取代国防支援计划 (Defense Support Program, DSP) 预警卫星而部署的新型弹道导弹预警卫星系统, 主要包括大椭圆轨道 (Highly Elliptical Orbit, HEO) 预警卫星和地球同步轨道 (Geosynchronous, GEO) 预警卫星。相对 DSP 预警卫星, SBIRS-GEO 卫星工作波段在原有短波红外 (Short-Wave Infrared, SWIR) 和中波红外 (Mid-Wave Infrared, MWIR) 的基础上增加了直视地表 (See-To-Ground, STG) 波段。美国航空公司官方宣称 STG 波段的任务为技术情报 (Technical Intelligence, TI) 和战场空间描述 (Battle Space Characterization, BSC) 而不包括导弹探测<sup>[1]</sup>。同时, 相对于中波红外和短波红外波段而言, 在 STG 波段, 液体导弹尾焰辐射较弱而地球/大气背景辐射强烈<sup>[2]</sup>, 所以 STG 波段确实存在无法用于导弹探测的可能。因此, 为了更准确地分析 SBIRS 预警卫星系统的预警能力, 需要对 STG 波段的导弹预警能力进行系统、深入的研究。目前, 国内学者对预警卫星探测能力的研究集中在 SWIR 和 MWIR 两个波段<sup>[3]</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等要素出发, 从系统角度选取了信噪比<sup>[4]</sup>、等效目标<sup>[5]</sup>、亮度视在对比度<sup>[6]</sup>、辐射通量表观对比度<sup>[7]</sup>等评估指标分析了红外预警卫星可能的探测波段和能力, 但是尚未见到关于 STG 波段的可能范围和探测能力的研究报道, 只给出了简单的定性结论, 认为其具有导弹预警功能, 且能在导弹点火的同时就发现目标<sup>[7-8]</sup>。

鉴于此, 文中建立了红外预警卫星 STG 波段范围和探测能力计算模型体系, 具体包括导弹尾焰红外辐射模型、地球/大气环境特性模型、点目标辐射通量表观对比度模型、预警卫星系统噪声模型和最低探测高度模型。据此研究了 STG 波段可能的波段范围, 并进一步探讨了 SBIRS-GEO 预警卫星在该波段的导弹预警能力。研究结论可以为 SBIRS-GEO 预警卫星探测能力分析以及我国导弹预警卫星探测波段选择提供一定参考。

## 1 模型体系

### 1.1 导弹尾焰红外辐射模型

导弹尾焰红外辐射模型建模方法如下: 使用

FLUENT 模型计算尾焰流场, 其中尾焰中气体粒子两相耦合流场使用离散颗粒模型计算, 尾焰中的复燃反应使用有限速率化学反应模型计算; 计算红外辐射时, 高温气体辐射参数基于 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<sup>[2]</sup>。

### 1.2 地球/大气环境特性模型

地球/大气环境特性主要包括地球大气背景辐射特性、红外辐射大气透过率以及大气路径辐射, 采用中国科学院安徽光学精密机械研究所开发的通用大气辐射传输软件 (Combined Atmospheric Radiative Transfer, CART) 模型<sup>[9]</sup>求解, 该软件集成了我国典型地区的大气模式, 且具有速度快、精度高的优点。

### 1.3 点目标辐射通量表观对比度模型

导弹尾焰相对于预警卫星探测器而言为点目标, 其与周围背景的辐射通量表观对比度为<sup>[7]</sup>:

$$C = \frac{I_m \tau_a + L_{\text{path}} A_m - L_B A_m}{L_B A_p} \quad (1)$$

式中:  $I_m$  为尾焰辐射强度;  $\tau_a$  为大气透过率;  $L_{\text{path}}$  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;  $L_B$  为地球以大气背景的辐射亮度。

辐射通量表观对比度光谱计算公式为:

$$C_\lambda = \frac{I_{m\lambda} \tau_{a\lambda} + L_{\text{path}\lambda} A_m - L_{B\lambda} A_m}{L_{B\lambda} A_p} \quad (2)$$

### 1.4 系统噪声模型

SBIRS-GEO 预警卫星探测系统的干扰主要源自三个部分: 探测器的电子学噪声、地球/大气背景辐射以及光学系统热辐射。选用系统等效目标 (SET) 表示 SBIRS-GEO 预警卫星探测系统的系统噪声, SET 定义为系统信噪比为 1 时探测系统的视在带内目标强度<sup>[10]</sup>。类似地还可以定义探测器噪声等效目标 NET, 背景等效目标 BET, 以及光学系统热辐射等效目标 OET。则 SET 可表示为:

$$\text{SET} = \sqrt{\text{NET}^2 + \text{OET}^2 + \text{BET}^2} \quad (3)$$

其中, NET、BET、OET 可分别表示为:

$$\text{NET} = \frac{\text{NEP}}{\tau_o S_o / L_{\text{ms}}^2} \quad (4)$$

$$\text{BET} = \frac{E_d S_d}{\tau_o S_o / L_{\text{ms}}^2} \quad (5)$$

$$\text{OET} = \frac{4M_o S_o L_{\text{ms}}^2}{\tau_o \pi (D_o^2 + 4f^2)} \quad (6)$$

式中: NEP 为探测器单元的噪声等效功率;  $L_{\text{ms}}$  为导

弹到卫星光学系统的距离; $\tau_o$ 为光学系统的透过率; $S_o$ 为光学系统有效面积; $E_d$ 为像元接收的照度; $S_d$ 为探测器单元面积; $M_o$ 为光学系统自身的热辐射出射度; $D_o$ 为光学系统等效直径; $f$ 为焦距。

### 1.5 最低探测高度模型

最低探测高度的定义是建立在预警卫星单次虚警概率、单次探测概率、累积虚警概率、累积探测概率定义的基础上的。

在没有目标时,预警卫星噪声  $i_n$  超过阈值  $I_t$  的概率称为卫星的虚警概率  $P_{fa}$ :

$$P_{fa} \approx \frac{1}{2} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{I_t}{\sqrt{2} I_n} \right) \right] \quad (7)$$

式中: $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-y^2) dy$  是误差函数。

在有目标信号时,预警卫星探测到的信号  $i_s$  加上系统噪声  $i_n$  超过系统设定阈值  $I_t$  的概率称为探测概率  $P_d$ :

$$P_d \approx \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{I_s - I_t}{\sqrt{2} I_n} \right) \right] \quad (8)$$

根据累积检测原理,在  $m$  个脉冲中至少可以检测到  $n$  次目标的累积探测概率和虚警概率可表示为<sup>[11]</sup>:

$$P_{D(x \geq n)} = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} C_m^k (P_d)^k (1 - P_d)^{m-k} \quad (9)$$

$$P_{FA(x \geq n)} = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} C_m^k (P_{fa})^k (1 - P_{fa})^{m-k} \quad (10)$$

式中: $P_{D(x \geq n)}$ 、 $P_{FA(x \geq n)}$ 表示  $m$  次探测中至少累积探测  $n$  次的探测概率和虚警概率; $P_d$ 、 $P_{fa}$ 为单次探测概率和单次虚警概率。

对于 SBIRS-GEO 预警卫星而言,卫星规定的阈值探测概率  $P_{Dth}$  和阈值虚警概率  $P_{FAth}$  表示设计要求预警卫星在以不小于  $P_{Dth}$  的探测概率探测到目标时,仍能保证虚警概率不大于  $P_{FAth}$ 。根据  $P_{Dth}$  和  $P_{FAth}$  可以得到预警卫星的阈值阈噪比  $TNR_{th}$  和阈值信噪比  $SNR_{th}$ 。

卫星对导弹的最低探测高度  $h_{min}$  可定义为:导弹辐射信号与 SBIRS-GEO 卫星系统噪声信号之比第一次大于阈值信噪比  $SNR_{th}$  时导弹爬升到的海拔高度。根据定义可以推导出最低探测高度  $h_{min}$  处导弹的视在波段辐射强度  $I_{mv}$  满足下式:

$$I_{mv} \geq SNR_{th} \cdot SET \quad (11)$$

式中:SET 为系统等效目标,代表 SBIRS-GEO 预警卫星的系统噪声,可用公式(3)描述。

## 2 仿真分析

### 2.1 STG 波段范围确定

由于 STG 波段需具有穿透大气直接探测地表辐射的作用,假设其目的为在导弹点火瞬间实现探测,那么其探测波段的设定需要考虑导弹位于地球表面时的表观对比度光谱。文中仿真气象条件如下: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  $0^\circ$ ,观测天顶角为  $180^\circ$ ,太阳天顶角和方位角都为  $0^\circ$ ,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。尾焰辐射计算参数如下: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

Tab.1 Mass fractions of species at nozzle outlet

Species	Case 1	Case 2
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

Tab.2 Afterburning reaction model in the plume

Reaction formula	Reaction constant
CO+O+M=CO <sub>2</sub> +M	$7 \times 10^{-35} \exp(-2 200/T)$
CO+OH=CO <sub>2</sub> +H	$2.8 \times 10^{-17} T^{1.3} \exp(-2 200/T)$
H <sub>2</sub> +OH=H <sub>2</sub> O+H	$1.9 \times 10^{-15} T^{1.3} \exp(-1 825/T)$
H <sub>2</sub> +O=OH+H	$3.0 \times 10^{-14} T \exp(-4 480/T)$
H+O <sub>2</sub> =OH+O	$2.4 \times 10^{-10} \exp(-8 250/T)$
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	$1 \times 10^{-25} T^{-2}$

图 1 和图 2 分别为典型液体和固体导弹位于地表时的尾焰表现对比度光谱曲线。

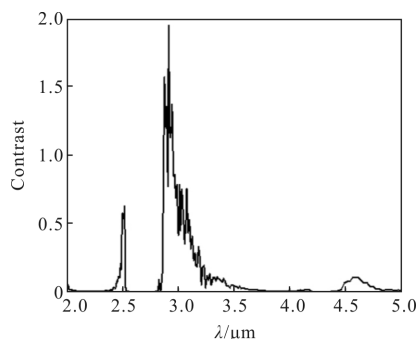


图 1 液体导弹尾焰在地表的表现对比度光谱

Fig.1 Apparent contrast spectrum of liquid rocket plume on the ground

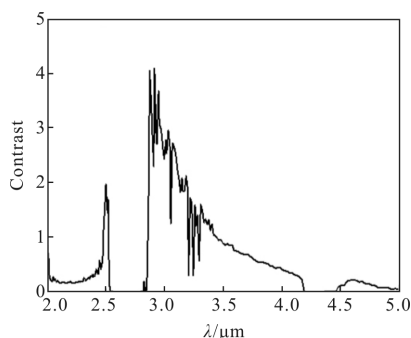


图 2 固体导弹尾焰在地表的表现对比度光谱

Fig.2 Apparent contrast spectrum of solid rocket plume on the ground

观察图 1 和图 2 可以发现，液体和固体导弹尾焰表现对比度光谱的峰值均在  $2.9 \mu\text{m}$  附近。另外，由于该波段位于大气窗口，地球/大气背景辐射将在系统噪声中占主导地位，在设定波段宽度时可以选择表现对比度峰值附近较窄的波段范围。据此，文中认为如果 SBIRS-GEO 预警卫星将 STG 波段用于导弹探测，其工作波段可能为  $2.86\sim 3.0 \mu\text{m}$ 。

### 2.2 STG 波段探测能力分析

为研究 SBIRS-GEO 预警卫星在 STG 波段的探测能力，首先对弹道导弹尾焰在该波段的表现对比度光谱随导弹高度的变化规律进行深入分析。然后分析不同条件下 SBIRS-GEO 预警卫星在 STG 波段对弹道导弹的最低探测高度。

#### 2.2.1 STG 波段表现对比度光谱随高度变化规律分析

STG 波段位于大气窗口，可用于提高 SBIRS-GEO 预警卫星对导弹的早期预警能力，因此，主要研究该波段对导弹尾焰在大气底层时的探测能力。

图 3 和图 4 分别为典型液体和固体导弹尾焰在 0~15 km 高度范围内的 STG 波段表现对比度变化的光谱曲线。

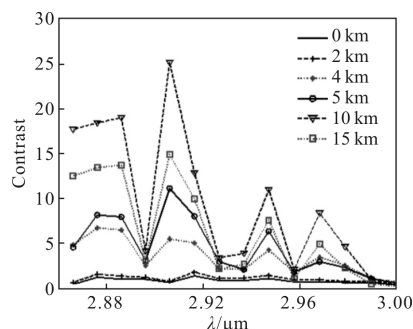


图 3 液体导弹尾焰 STG 波段在 0~15 km 的表现对比度光谱

Fig.3 Apparent contrast spectrum of liquid rocket plume at the altitude of 0-15 km

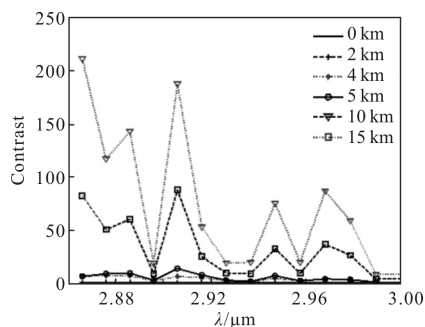


图 4 固体导弹尾焰 STG 波段在 0~15 km 的表现对比度光谱

Fig.4 Apparent contrast spectrum of solid rocket plume at the altitude of 0-15 km

图 3 和图 4 表明，在 STG 波段，液体导弹的表现对比度光谱始终小于固体导弹尾焰的表现对比度光谱，且二者随高度的变化规律也有所不同。

对于液体导弹而言，随高度的增加，尾焰的表现对比度光谱呈先增大后减小的规律，且在海拔 10 km 达到最大值(约为 25)。原因分析如下，液体导弹尾焰表现对比度主要受大气透过率和尾焰固有辐射影响，而尾焰固有辐射又受尾焰流场温度和尾焰尺寸共同影响。在大气透过率、尾焰温度和尾焰尺寸三个因素中，大气透过率和尾焰尺寸随高度升高而增大，尾焰温度随高度升高而降低。首先，虽然 STG 波段处于大气窗口，透过率远高于非大气窗口波段，但在海平面时透过率并不为 1，而是随高度增加逐渐增大；其次，高空大气压强较低，尾焰喷出喷口可以更充分膨胀，所以随高度增大，尾焰尺寸逐渐增大；最

后, 液体火箭尾焰流场温度会随尾焰膨胀充分而逐渐降低, 即流场温度会随高度升高而逐渐降低<sup>[12]</sup>。上述三个因素共同作用导致液体导弹尾焰表观对比度光谱呈现如图 3 所示的规律。其中在 0~10 km 阶段, 透过率减小和尾焰尺寸增大对导弹尾焰红外辐射表观对比度光谱增大的影响超过了尾焰流场温度下降的影响, 因而表观对比度光谱随高度升高而增大; 而高于 10 km 后, 表观对比度光谱开始下降, 因为 2.86~3.0 μm 波段处于尾焰气体辐射谱带的边缘, 随着海拔高度的进一步增加, 尾焰流场温度下降, 辐射光谱变窄, 导致该波段内辐射强度显著变小, 对表观对比度光谱降低的影响超过了透过率增大和尾焰尺寸增大的影响。

对于固体导弹而言, 随高度的增加, 尾焰的表观对比度光谱持续增加, 在 15 km 高度最大值超过 200。这是因为, 一方面, 随高度的增加, 大气透过率和尾焰尺寸都逐渐增大; 另一方面, 固体导弹尾焰中由于固体粒子的存在, 流场温度随高度下降不明显, 且由于在 STG 波段为尾焰中气体辐射光谱的波谷, 粒子辐射占主要部分<sup>[13]</sup>, 不会出现液体火箭尾焰在 STG 波段红外辐射强度明显下降的现象。

通过上述分析可知, 无论是固体还是液体导弹目标, STG 波段目标与背景之间的表观对比度较大, 都可能使 SBIRS-GEO 预警卫星具备在导弹发射瞬间探测目标的能力。特别的, 由于固体导弹尾焰 STG 波段表观对比度远高于液体导弹尾焰 STG 波段表观对比度, SBIRS-GEO 预警卫星 STG 波段探测固体导弹目标的能力远高于探测液体导弹目标的能力。

### 2.2.2 最低探测高度分析

以 2.86~3.0 μm 作为 SBIRS-GEO 预警卫星 STG 波段的工作波段, 利用系统噪声模型和最低探测高度模型研究典型条件下 SBIRS-GEO 预警卫星 STG 波段对弹道导弹的预警能力。首先分析阈值探测概率和阈值虚警概率等系统参数对 SBIRS-GEO 预警卫星 STG 最低探测高度  $h_{min}$  的影响, 然后讨论其对不同燃料类型弹道导弹预警能力的差别。

(1) 仅改变预警卫星系统的阈值探测概率或阈值虚警概率, 保持其他条件恒定, 仿真分析上述两个参数对 SBIRS-GEO 预警卫星 STG 波段探测能力的影响。此时天气为晴空无云, 导弹为液体导弹, 仿真结果如表 3 所示。

表 3 SBIRS-GEO 预警卫星规定的探测概率和虚警概率变化对其 STG 波段探测能力的影响

Tab.3 Influence of detection probability and false alarm probability of SBIRS-GEO on the detectability with STG wave band

$P_{Dth}$	$P_{Falth}$	TNR <sub>th</sub>	SNR <sub>th</sub>	$h_{min}/km$
0.70	1e-4	3.719	4.244	6.824 5
0.80	1e-4	3.719	4.561	7.765 1
0.90	1e-4	3.719	5.001	-
0.95	1e-4	3.719	5.364	-
0.99	1e-4	3.719	6.046	-
0.95	1e-2	2.326	3.971	6.185 2
0.95	1e-3	3.090	4.735	8.345 1
0.95	1e-4	3.719	5.364	-
0.95	1e-5	4.264	5.909	-

为了保证系统探测的可靠性, 预警卫星系统需要满足一定的探测概率和虚警概率, 且阈值探测概率增大或阈值虚警概率减小都会增大预警卫星的 SNR<sub>th</sub>, 导致其预警能力的下降。分析表 3 数据可以发现, SBIRS-GEO 预警卫星在 STG 波段不能做到导弹一发射就发现目标, 且随着阈值探测概率增大或阈值虚警概率减小时, 系统探测的可靠性增加, 但却导致 SBIRS-GEO 预警卫星在 STG 波段可能探测不到目标。

(2) 仅改变导弹燃料类型, 保持其他条件恒定, 仿真计算导弹燃料类型对 SBIRS-GEO 预警卫星能力的影响。此时天气为晴空无云, 系统规定的阈值探测概率为 95%, 阈值虚警概率为 1%, 仿真结果如表 4 所示。

表 4 导弹推进剂类型变化对 SBIRS-GEO 预警卫星 STG 波段探测能力的影响

Tab.4 Influence of propellant type of missile on the detectability of SBIRS-GEO early warning satellite with STG wave band

Fuel type	$h_{min}/km$
Solid	2.122 6
Liquid	6.185 2

分析表 4 数据显示, 在满足一定探测概率和虚警概率的条件下, SBIRS-GEO 预警卫星在 STG 波

段探测固体导弹的能力明显强于液体,这主要由于固体导弹尾焰中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子不同于液体导弹辐射光谱在 STG 波段呈现明显的波谷,而是具有光谱连续的辐射性。

### 3 结 论

文中建立了研究 SBIRS-GEO 预警卫星 STG 波段选择范围以及探测能力的模型体系,分析了 STG 波段的可能选择范围,并从系统探测的角度研究了不同条件下 SBIRS-GEO 预警卫星 STG 波段的探测能力,得到结论如下:

(1) 为了能够尽早探测到导弹的发射,SBIRS-GEO 预警卫星的 STG 波段可能选为  $2.86\sim 3.0\ \mu\text{m}$ ;

(2) 在 STG 波段,由于尾焰中主要辐射成分不同,液体导弹尾焰和固体导弹尾焰在 STG 波段的表现对比度明显不同。首先,液体导弹尾焰的表现对比度随导弹高度的升高呈先增大后减小趋势,而固体导弹尾焰的表现对比度光谱随导弹高度的升高而持续增加;其次,固体导弹尾焰的表现对比度明显高于液体导弹的表现对比度;

(3) 考虑到系统可靠性,SBIRS-GEO 预警卫星 STG 波段对液体导弹的探测能力并不稳定,而对固体导弹则具有非常强的早期预警能力。

#### 参 考 文 献:

- [1] Slattery J E, Cooley P R. Space-Based Infrared Satellite System (SBIRS) requirements management [C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings, 1998: 223-232.
- [2] Liu Zunyang, Shao Li, Wang Yafu, et al. A band selection method for infrared warning satellites based on radiation flux apparent contrast spectrum[J]. *J Infrared Millim Wave*, 2014 (5): 492-496. (in Chinese)
- [3] 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. (in Chinese)
- [4] 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]. *J Infrared Millim Wave*, 2007, 26(6): 425-428. (in Chinese)
- [5] 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. (in Chinese)
- [6] Ye Qing, Sun Xiaoquan, Shao Li. Analysis of optimum detective wavebands for infrared early-warning satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 39 (3): 389-393. (in Chinese)
- [7] Li Xiaojiang, Jin Shan, Liao Hailing, et al. Analysis on infrared detecting and early warning capabilities of America's SBIRS GEO-1 satellite [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(1): 3-8. (in Chinese)
- [8] Ding Guozhen, Zhang Zhanyue, Guo Liwen, et al. Simulation and analysis of workflow and signal-to-noise ratio threshold for SBIRS -GEO early warning satellite's detector [J]. *Journal of Equipment Academy*, 2014(5): 78-82. (in Chinese)
- [9] Chen Xiuhong, Wei Heli, Yang Ping, 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.
- [10] Lomheim T S, Milne E L, Kwok L J D, et al. Performance/sizing relationships for a short-wave mid-wave infrared scanning point-source detection space sensor[J]. *IEEE*, 1999, 4: 1132138.
- [11] Ye Qing, Wang Yafu, Shao Li, et al. Detectability evaluation of DSP early-warning satellite [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010(6): 65-71. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] Liu Zunyang, Shao Li, Wang Yafu, et al. Influence of afterburning on infrared radiation of solid rocket exhaust plume [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0604001. (in Chinese)