

## 天基平台海云背景下飞机全链路成像特征建模及分析

袁航<sup>1</sup>, 王晓蕊<sup>1\*</sup>, 袁影<sup>1</sup>, 张卫国<sup>2</sup>, 郭冰涛<sup>2</sup>

- (1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;
2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 空中目标具有高速机动、战略突防和远程精确打击等特点, 针对这类目标构建广域、高效、精准探测、连续监视技术已成为空中目标探测体系面临的新挑战。基于空中目标的天基光学探测需求, 建立了复杂环境要素综合作用飞机尾焰的光学辐射特征模型, 形成飞机尾焰-海面/云层背景-环境大气-光学系统-成像探测器等要素耦合的全数字化链路光谱辐射成像特征精确预测模型。基于实测数据推演了飞机尾焰红外多光谱本征辐射。同时, 利用 FY-2G 遥感数据, 反演了中国南海某海域海面温度及云顶温度分布, 建立了海云背景光谱辐射模型。在此基础上综合考虑了背景辐射、大气路径辐射和大气衰减对飞机尾焰光谱辐射的影响, 建立了在光学系统入瞳前目标上行光谱辐射特性模型, 结合光学成像系统的衍射效应, 探讨了不同谱段、云类型下地球同步轨道红外成像系统对目标的可探测性。研究表明: 大气屏蔽波段对目标的探测效能优于宽波段; 针对不同的背景选择合理的探测波段有利于目标的高效探测。

**关键词:** 天基探测; 红外成像; 辐射传输; 多光谱; 建模仿真

**中图分类号:** TN249      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0204004

## Modeling and analysis of aircraft full-chain imaging characteristics in the sea surface and clouds from a space-based platform

Yuan Hang<sup>1</sup>, Wang Xiaorui<sup>1\*</sup>, Yuan Ying<sup>1</sup>, Zhang Weiguo<sup>2</sup>, Guo Bingtao<sup>2</sup>

- (1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;
2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The air target has the following characteristics: high-speed maneuver, strategic deep penetration and long-range precision strike. Building wide-area, high-efficiency, accurate detection and continuous monitoring for air targets has become a new challenge for air target detection. In view of the optical detection requirements of air targets, a radiation characteristic model of aircraft plume was established under the combined effect of complex environmental factors. An accurate prediction model of the full

收稿日期: 2019-10-08; 修订日期: 2019-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(61377007, 61575152, 61775174); 国防基础科研基金(JCKY2016208B001)

作者简介: 袁航(1993-), 女, 博士生, 主要从事复杂环境空天基目标红外辐射特性建模及仿真评估方面的研究。

Email: yhxidianedu0525@163.com

导师简介: 王晓蕊(1976-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电成像系统工程优化设计、协同仿真、性能测试与评估等方面的研究。

Email: xrwang@mail.xidian.edu.cn

chain including aircraft plume-sea/cloud background-environmental atmosphere-optical system-imaging detector was formed. The infrared multi-spectral self-radiation of the aircraft plume was derived based on the measured data. At the same time, the FY-2G remote sensing data was used to invert the sea surface temperature and cloud top temperature distribution in a certain sea area of the South China Sea, and the background radiation model of sea/cloud background was established. On this basis, the effects of background radiation, atmospheric path radiation and atmospheric attenuation on the spectral radiation of the aircraft plume were considered. A model for the upstream spectral radiation of the target at the entrance of the optical system was established. Combined with the diffraction effect of optical imaging system, the detectability of the infrared imaging system in the geostationary orbit under different spectral segments and cloud types was discussed. Research shows that detection efficiency is better in the atmospheric shielding band than in the wide band, and reasonable detection band selection in different backgrounds is conducive to efficient detection of targets.

**Key words:** space-based detection; infrared imaging; radiative transfer; multispectrum; modeling and simulation

## 0 引言

鉴于高威胁空中目标特征的复杂多样性、天地环境的广域性、目标运动的高时效性,如何针对空中运动目标,构建广域、高效、精准的侦察探测技术手段已成为我军空间态势感知体系建设面临的新挑战。与陆/海/空基相比,天基光学卫星装备具有独特优势,如发现时间早、发现效率高和探测方向佳,是提高战场侦察监视能力的有效手段。空中目标上行光谱辐射散射与环境变化紧密相关,需要加强空中目标和背景特性研究。因此,探讨不同谱段、背景下地球同步轨道预警卫星对目标的最佳可探测性具有重要的研究意义,为复杂背景特性建模、机理研究和地球同步轨道红外系统参数设计提供数据支持。

纵观公开文献,现有学者从多个方面开展了天基光学探测研究:Shen X 等人<sup>[1-2]</sup>讨论了长波红外下背景对低轨道红外成像系统空间目标探测的影响。Schweitzer C<sup>[3-4]</sup>等人通过研究背景与威胁目标信号辐射强度的差异,分析了导弹探测的最佳红外波段,讨论了不同的观测场景和空间分辨率对信背比的影响。相关学者针对 SBIRS-GEO 预警卫星系统分析了其工作原理、参数估计及探测能力,建立了预警卫星探测参数计算模型<sup>[5-7]</sup>。孙成明等人<sup>[8]</sup>基于光散射

理论和轨道动力学,计算了目标等效星等和目标探测信噪比随时间的变化关系。上述学者在天基光学探测工作机理和探测能力方面的研究取得了一定的进展,但针对飞机尾焰-海面/云层背景-环境光照-大气-光学系统-光学成像探测器等要素耦合的上行天基传感器入瞳处的全数字化链路光谱辐射特性模型的建立不够全面。

文中建立海面、云层辐射要素综合作用的飞机尾焰的光学辐射特征模型,形成上行辐射全数字链路光学辐射卫星成像特征精确预测平台。分析了不同探测条件下的目标成像能力。文中的研究结果为地球同步轨道卫星的探测效能分析及系统参数设计提供理论依据及数据支持。

## 1 海云背景及目标辐射特性建模

天基平台对飞机尾焰进行探测时,总的背景辐射为云层的直接辐射、云层散射太阳辐射、海面背景自身辐射透过云层的辐射、海面反射太阳辐射透过云层的辐射及大气路径热辐射,这几种辐射源的叠加。探测器接收到总的背景辐射场分布可表示为:

$$L_b^\uparrow(\lambda) = Z_e \tau_c L_c^\uparrow(\lambda) + Z_e \tau_s L_s^\uparrow(\lambda) + (1 - Z_e) \tau_a L_s^\uparrow(\lambda) + L_a^\uparrow(\lambda) \quad (1)$$

式中: $Z_e$ 为云层在视场中所占比例; $\tau_c$ 、 $\tau_s$ 和 $\tau_a$ 分别

为探测方向上云顶至探测器间的大气透过率、海面辐射穿透云层至探测器的大气透过率以及海面至探测器的大气透过率; $L_c^\uparrow$ 为云层的上行辐射; $L_s^\uparrow$ 为海面的上行辐射; $L_a^\uparrow$ 为大气路径辐射。图 1 为地球同步轨道红外系统对飞机目标探测示意图。

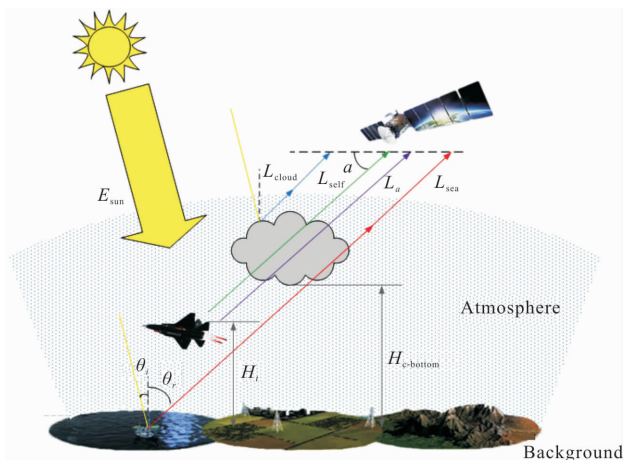


图 1 地球同步轨道红外系统对目标探测示意图

Fig.1 Diagram of target being detected by the infrared imaging system from geostationary orbit

探测器接收到总的目标辐射分布可表示为:

$$L_{trg}^\uparrow(\lambda) = \tau[L_{plume}^\uparrow(\lambda) + L_{b-via-t}^\uparrow(\lambda)] + L_a^\uparrow(\lambda) \quad (2)$$

式中: $\tau$ 为目标至探测器的大气透过率; $L_{plume}^\uparrow$ 为尾焰上行辐射; $L_{b-via-t}^\uparrow$ 为背景透过尾焰的上行辐射; $L_a^\uparrow$ 为目标至探测器的大气路径上行辐射。

### 1.1 云层辐射特性建模

地球同步轨道红外成像系统观测目标时,主要受到云层自身辐射及其对太阳光上行散射的影响。云的红外辐射特性与云层内部颗粒物的组成、云滴尺寸分布及密度等参数密切相关。依据云的外部形态及内部组成等物理参数,常见的云类型分为:卷层云、层积云、积雨云、高层云卷云,其中卷层云和卷云为冰云,其余为水云。为了真实反映云层背景的辐射特性,文中利用 FY-2G 遥感数据,基于不同水云和冰云的光谱发射率及散射相函数,分别建立云顶上行自身辐射及散射辐射特性。对于天基探测,云层内部的散射及透射辐射不需要考虑,只考虑云顶的上行辐射,故云背景辐射场分布可表示为:

$$L_{cloud}(\lambda) = L_{cloud,self}^\uparrow(\lambda) + L_{cloud,refl}^\uparrow(\lambda) \quad (3)$$

式中: $L_{cloud,refl}^\uparrow$ 为云顶对太阳辐射的上行反射; $L_{cloud,self}^\uparrow$ 为云层的上行自身辐射。

#### 1.1.1 云层自身辐射特性建模

云层一方面吸收太阳辐射,同时也通过本身的温度辐射发出能量。云层的热辐射采用灰体近似处理:

$$L_{cloud,self}^\uparrow(\lambda) = \varepsilon_{cloud}(\lambda) \frac{M(T_{cloud}, \lambda)}{\pi} \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_{cloud}$ 为云层发射率; $M(T_{cloud}, \lambda)$ 为当云顶温度为 $T_{cloud}$ 且波长为 $\lambda$ 时的黑体辐射度。如图 2 和图 3 为 2017 年 12 月 20 日当地时间 12:00,云顶温度及云分类分布反演结果。

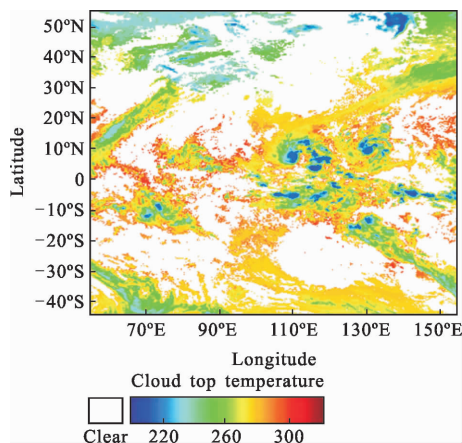


图 2 云顶温度分布

Fig.2 Cloud top temperature distribution

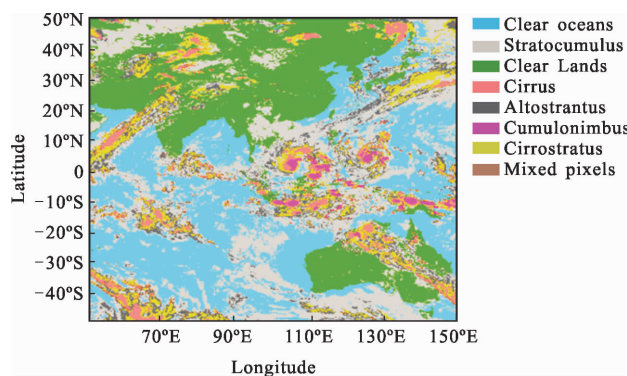


图 3 云顶分类分布

Fig.3 Cloud top classification

云层的红外发射率计算公式如下:

$$\varepsilon_{cloud} = 1 - \exp(-kz) \quad (5)$$

式中: $k$ 为吸收系数; $z$ 为云层厚度。对于水云,吸收系数由下式定义:

$$k_{\text{water-cloud}}(\lambda) = \pi \int_{r_1}^{r_2} r^2 Q_{\text{abs}}(\lambda, r) n(r) dr \quad (6)$$

式中： $r$  为云滴半径； $n(r)$  为云滴大小的分布函数； $Q_{\text{abs}}$  为归一化吸收截面。对于冰云，吸收系数可定义为：

$$k_{\text{ics-cloud}}(\lambda) = (1-w)\beta \quad (7)$$

式中： $\beta$  为消光系数； $w$  为单次散射反照率。根据云层发射率的计算公式，结合云顶温度分布及云层分类数据，即可建立云层背景的辐射亮度场分布。

### 1.1.2 云层反射太阳辐射特性建模

地球同步轨道红外成像系统对目标成像时，云层中包含的大量尺度不一、形状各异的冰水粒子对太阳有较强的散射作用，可能会对目标的探测造成干扰，应予以重点考虑。引入双向反射率分布函数衡量云层在不同的太阳入射角度和观测角度下的反射能力。

$$L_{\text{cloud,refl}}^{\uparrow}(\lambda) = \tau_{\text{a-sun-cloud}} E_{\text{sun}}(\lambda) \cos\theta_i \text{BRDF}_{\text{cloud}}(\lambda, \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \quad (8)$$

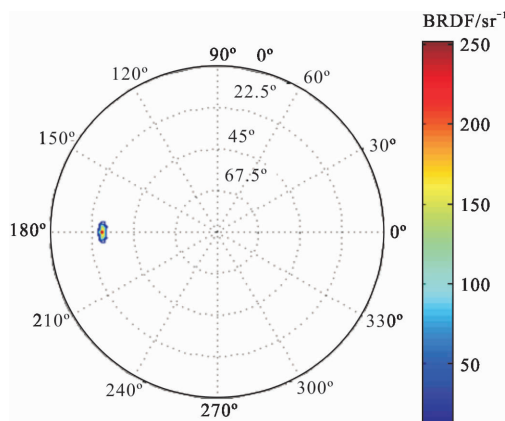
式中： $\tau_{\text{a-sun-cloud}}$  为太阳辐射至云顶处的大气透过率； $\text{BRDF}_{\text{cloud}}$  为云顶的双向反射率； $\theta_i(\varphi_i)$  和  $\theta_r(\varphi_r)$  分别为入射天顶角(入射方位角)和反射天顶角(反射方位角)。将云层假设为一平行平板，则均匀平板上的单次散射解析解为<sup>[9]</sup>：

$$\text{BRDF}_{\text{cloud}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{w}{4\pi} P(\Theta) \frac{\cos\theta_i}{\cos\theta_i + \cos\theta_r} \quad (9)$$

式中： $P(\Theta)$  为云层的有效散射相函数； $\Theta$  为实际的散射角，它与入射角和反射角之间存在以下联系：

$$\cos\Theta = \cos\theta_i \cos\theta_r - \sin\theta_i \sin\theta_r \cos(\varphi_i - \varphi_r) \quad (10)$$

结合 Mie 散射理论计算的水云和冰云的散射相函数，图 4 计算了经度为 105°、纬度为北纬 5°、太阳



(b) 冰云  
(b) Ice cloud

图 4 云层双向反射率分布

Fig.4 Bidirectional reflectance distribution of clouds

入射天顶角为 28.43°、太阳入射方位角为 0°、当地时间 12:00 时 3~5 μm 波段下水云和冰云的双向反射率分布。

### 1.2 海面辐射特性建模

海面在短、中波下对太阳辐射的反射明显。在一定角度观察时，海面出现“波光粼粼”的亮带现象。为了分析海面亮带对飞机目标探测的影响，须准确建立海面背景的辐射模型。

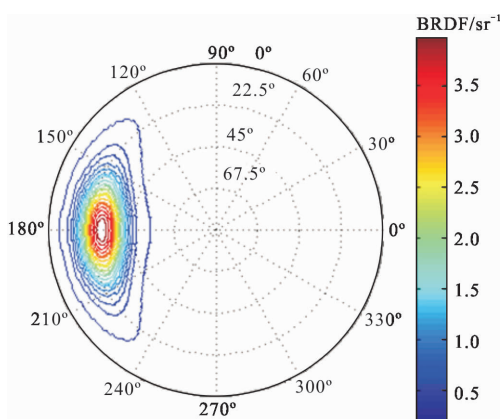
$$L_{\text{sea}}^{\uparrow}(\lambda) = L_{\text{sea,refl}}^{\uparrow}(\lambda) + L_{\text{sea,em}}^{\uparrow}(\lambda) = \varepsilon_{\text{sea}} \frac{M(T_{\text{sea}}, \lambda)}{\pi} + \tau_{\text{s-s}} E_{\text{sun}} \cos\theta_i \text{BRDF}_{\text{sea}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \quad (11)$$

式中： $L_{\text{sea,refl}}^{\uparrow}$  为海面对太阳辐射的反射； $L_{\text{sea,em}}^{\uparrow}$  为海面自身辐射； $\varepsilon_{\text{sea}}$  为海面发射率； $M(T_{\text{sea}}, \lambda)$  为海面温度为  $T_{\text{sea}}$  且波长为  $\lambda$  时的黑体辐出度； $\tau_{\text{s-s}}$  为太阳辐射至海面的大气透过率； $\text{BRDF}_{\text{sea}}$  为海面的双向反射率。为了实现海面与云层背景辐射数据的时空匹配特性，采用 FY-2G 海面温度反演遥感数据(图 5)，结合上式建立海面的自身辐射模型。

Cox-Munk 海面波谱分布模型考虑了风速、风向、遮挡效果、观测方向等因素对海面红外辐射特性的影响。已知入射光线和反射光线的天顶和方位角，可以用下式计算出海面双向反射函数<sup>[10]</sup>：

$$\text{BRDF}_{\text{sea}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{\pi P(Z_u, Z_v) \rho(\omega)}{4 \cos\theta_i \cos^4\beta} \quad (12)$$

式中： $\rho(\omega)$  为海面反射率，通过 Fresnel 反射定律求得； $\beta$  为小面元倾斜率； $P(Z_u, Z_v)$  为海面坡度的概率分布：



(a) 水云  
(a) Water cloud



$$P(Z_u, Z_v) = \frac{1}{2\pi\sigma_x^2\sigma_y^2} \exp\left(-\frac{Z_u^2}{2\sigma_x^2} - \frac{Z_v^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (13)$$

式中： $\sigma_x^2$  和  $\sigma_y^2$  分别为迎风 and 侧风方向的均方斜率，均为风速  $U$  的函数。

$$\begin{cases} \sigma_x^2 = 0.003 + 0.00192U \\ \sigma_y^2 = 0.00316U \end{cases} \quad (14)$$

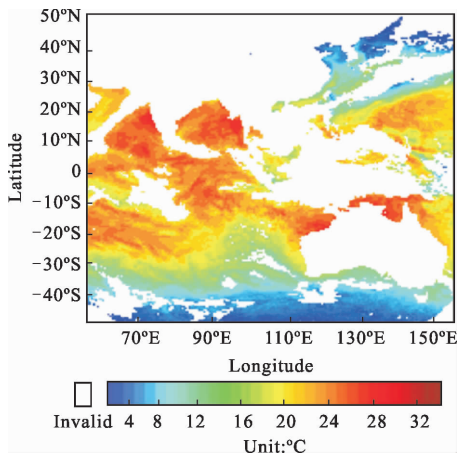


图 5 海面温度场分布

Fig.5 Sea surface temperature field distribution

基于 Cox-Munk 模型计算海面的双向反射率函数，结合海面背景辐射模型公式建立海面反射辐射场分布。图 6 为海面的双向反射率分布结果。

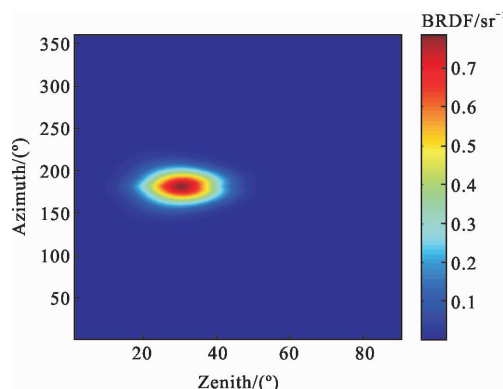


图 6 海面双向反射率分布

Fig.6 Bidirectional reflectance distribution of sea surface

### 1.3 目标辐射特性建模

尾焰的本征热辐射可表示为：

$$L_{\text{plume}}^{\uparrow}(\lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\text{trg}}(\theta, \lambda) L_{\text{bb}}(\lambda, T_{\text{trg}}) d\lambda \quad (15)$$

式中： $\varepsilon_{\text{trg}}$  为尾焰发射率； $L_{\text{bb}}$  为当目标温度为  $T_{\text{trg}}$  时的

黑体辐射亮度。从飞机机头到尾喷管管后 0.5 m 处测得的 90°探测角(探测方向与垂直方向的夹角)下的光谱发射率<sup>[11]</sup>如图 7 所示。

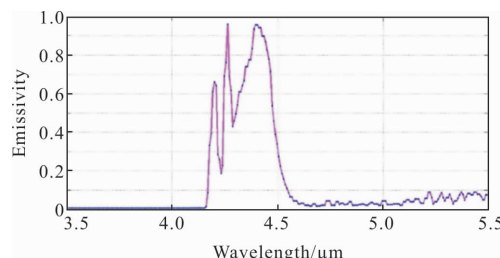


图 7 飞机尾焰光谱发射率

Fig.7 Spectrum emissivity of the plume

为了准确获得飞机尾焰辐射亮度分布。文中基于实测数据推演的飞机尾焰的绝对温度、发射率及透过率数据<sup>[11]</sup>，首先计算了飞机尾焰自身绝对辐射特性；其次，在此基础上根据归一化的尾焰辐射数据推导了飞机尾焰自身表观辐射亮度；最后考虑了大气对目标热辐射的衰减，利用插值算法，生成了地球同步轨道卫星光学系统入瞳前的尾焰自身辐射亮度场分布。如图 8 为 90°探测角度下涡轮喷气战斗机在最大转速工作状态下尾焰的温度分布数据。

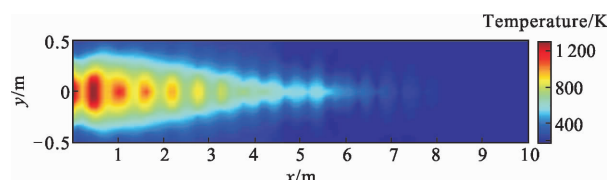


图 8 尾焰温度场分布

Fig.8 Plume temperature field distribution

飞机尾焰的气体或等离子体体积是部分透明的。因此，通过飞机尾焰透过背景的辐射可以表示为：

$$L_{\text{b-via-t}}^{\uparrow}(\lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\text{sea}} L_{\text{bb}}(\lambda, T_{\text{sea}}) \tau_{\text{trg}}(\lambda) \tau_{\text{a-sea-trg}}(\lambda) d\lambda \quad (16)$$

式中： $\tau_{\text{trg}}$  为尾焰的透过率； $\tau_{\text{a-sea-trg}}$  为海平面与尾焰间的大气透过率。

## 2 海面云层背景下飞机成像特征建模

根据飞机尾焰红外辐射特性的计算结果，讨论了地球同步轨道卫星像面上目标的空间成像特性和能量特性。如果辐射源的立体角( $A_{\text{trg}}/R^2$ )远小于探测器的立体角( $A_d/f^2$ )，则可将辐射源近似为点源。根据

上述准则将飞机尾焰作为点辐射源考虑。图 9 为地球同步轨道红外卫星的探测成像示意图。

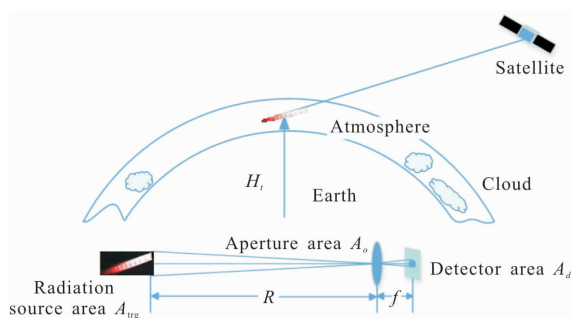


图 9 地球同步轨道红外卫星的探测成像示意图

Fig.9 Diagram of detection and imaging by the infrared satellite in the geostationary orbit

### 2.1 目标成像特征分析

理想成像情况下，成像大小与辐射源大小呈线性关系。而实际成像过程中，点辐射源在成像系统衍射效应作用下，将产生一定大小的模糊斑。当地球同步轨道红外卫星探测海面云层背景下飞机尾焰目标时，关键参数之一是位于模糊斑中心位置处的探测器像元接收到的目标辐射能量的比例，该比例决定了观测到的信号强度。飞机尾焰目标辐射经过地球同步轨道卫星光学成像系统时会产生夫朗和费圆孔衍射，像面中心点的辐射强度可表示为：

$$I' = \tau_0 I_t \left[ \frac{2J_1(\varphi)}{\varphi} \right]^2 \quad (17)$$

式中： $\tau_0$  为光学系统的透过率； $J_1(\varphi)$  为一阶贝塞尔函数； $\varphi$  为圆孔边缘与中心点在同一方向上光线的相位差； $I_t$  为目标辐射强度，可表示为公式(18)。

$$I_t = \tau_0 L_{trg}^\uparrow A_{trg} \quad (18)$$

式中： $L_{trg}^\uparrow$  为飞机尾焰在光学系统入瞳前的辐亮度； $A_{trg}$  为目标面积。

### 2.2 目标信号特征建模

利用点源目标信号响应特性模型<sup>[12]</sup>，依据光学成像理论计算目标经光学系统后探测器接收的目标与背景的辐射强度差值，利用探测器的响应特性转换为电压信号。目标在地球同步轨道红外卫星探测器像元产生的信号电压可表示为：

$$\Delta V_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda \frac{\pi}{4} \frac{\Delta L(\lambda) A_d}{F^2} \frac{A_{trg}}{A_{DAS}} \tau_o(\lambda) \tau_{atm}(\lambda) d\lambda \quad (19)$$

式中： $\Delta L$  为目标与周围背景辐射引起的相对辐射差值； $\Delta L = L_{trg}(\lambda, T_T) - L_b(\lambda, T_T)$ ； $F$  为红外预警卫星光学系统  $F$  数； $A_d$  为探测器面积； $A_{trg}$  为目标辐射源面积， $A_{DAS}$  为探测器像元的立体张角在物空间的投影面积； $M_{optics}$  为光学系统放大率； $R$  为探测器的波段响应度<sup>[13]</sup>。根据对称性，建立如下公式：

$$\frac{A_{DAS}}{R^2} = \frac{A_d}{f^2} \quad (20)$$

当衍射效应不可忽略时，目标产生的信号电压必须通过非周期传递函数(ATF)进行校正。公式(20)修正为：

$$\Delta V_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda \frac{\pi}{4} \frac{\Delta L(\lambda) A_d}{F^2} ATF \tau_o(\lambda) \tau_{atm}(\lambda) d\lambda \quad (21)$$

目标传递函数(TTF)可以表示为：

$$TTF = \frac{ATF_{sys}}{ATF_{ideal}} = ATF_{sys} \left( \frac{A_{DAS}}{A_{trg}} \right) \quad (22)$$

式中： $ATF_{sys}$  为实际情况下的 ATF 值； $ATF_{ideal}$  为理想情况下的 ATF 值。将公式(22)代入公式(21)：

$$\Delta V_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda \frac{\pi}{4} \frac{\Delta L(\lambda) A_d}{F^2} ATF \frac{A_{DAS}}{A_{trg}} \tau_o(\lambda) \tau_{atm}(\lambda) d\lambda \quad (23)$$

依据光电成像系统的 A/D 转换器位数进行灰度量化，假定 A/D 转换器的光电转换位数是  $\alpha$ ，电压信号的范围是  $V_{max} \sim V_{min}$ 。每个检测器单元输出的灰度值通过以下方法计算：

$$G(i, j) = \frac{2^\alpha - 1}{V_{max} - V_{min}} (\Delta V_s(i, j) - V_{min}) \quad (24)$$

## 3 探测性能分析及成像仿真

基于遥感数据的云、海复杂背景多光谱辐射场的生成方法及飞机尾焰目标的多光谱辐射特性计算结果，采用信杂比讨论了地球同步轨道红外成像系统下飞机尾焰辐射特征的可探测性。根据地球同步轨道红外成像系统对点目标的探测性能分析<sup>[14]</sup>、公开资料<sup>[15-16]</sup>以及相关领域科技发展水平对地球同步轨道红外成像系统的典型战技参数进行推测，分别取探测器像元尺寸  $d=15 \mu m$ ，探测器尺寸  $b=0.016 m$ ，探测器地面分辨率  $r_s=600 m$ ，轨道高度  $H=35800 km$ ，光学系统口径  $D_o=0.55 m$ ，光学系统等效焦距  $f'=1.074 m$ ，光学系统透过率  $\tau_o=0.7$ ，归一化探测率  $D^*=2 \times 10^{11} W^{-1} \cdot m \cdot Hz^{-1/2}$ ，等效带宽  $\Delta f=50 Hz$ 。文中仿真了不同探测波段、不同云背景、不同探测时间下的目标的成像特征，同时文中采用局部信杂比<sup>[15]</sup>

分析了目标探测性能。

$$SCR = \frac{\bar{I}_t - \bar{I}_b}{\sigma_b} \quad (25)$$

式中： $\bar{I}_t$  为目标均值； $\bar{I}_b$  为目标所在位置比目标大 2 倍范围内的背景均值； $\sigma_b$  为比目标大 2 倍范围内的背景方差。文中研究结果为地球同步轨道成像系统的探测效能分析提供理论依据及数据支持。

### 3.1 不同探测波段

根据地球同步轨道红外成像系统的典型参数，确定探测视场；基于冰云、水云和海面的分布模型，分别生成探测视场下的海面、云层温度纹理、发射率纹理，双向反射率纹理，太阳透过云层至海面的入射辐射纹理，太阳透过大气至云顶的入射辐射纹理，海面至云顶的大气透过率纹理、以及云顶至探测器的大气透过率纹理；利用建立的复杂背景多光谱辐射模型计算背景辐射纹理，结合目标辐射特性计算结果，采取 8 位数字量化，图 10 仿真了不同探测波段下飞机高度为 20 km 且探测角度为 90° 时目标的多光谱成像结果预测。

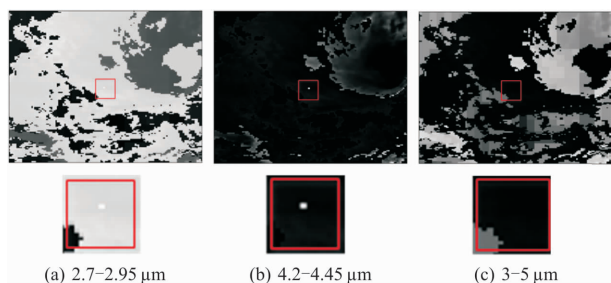


图 10 不同波段目标成像特征预测

Fig.10 Prediction of target imaging characteristics under different bands

由图 10 可知：在 2.7~2.95 μm 和 4.2~4.45 μm 波段下，目标更容易被探测到。在宽波段探测下，目标始终被背景淹没，无法探测。主要原因在于 2.7~2.95 μm 波段和 4.2~4.45 μm 波段属于大气屏蔽波段，背景至地球同步轨道红外成像系统的大气透过率相比 3~5 μm 波段很小。例如，当云顶高度为 3 km 时，2.7~2.95 μm 波段和 4.2~4.45 μm 波段下云顶至探测器间的大气透过率分别为 0.168 5 和 0.003 1；宽波段下的大气透过率为 0.666 4。同时，在 90° 探测条件下不同波段下的背景形态均不相同，这是因为三个波段下的背景辐射贡献源不同。2.7~2.95 μm 波段

下的背景辐射主要贡献来自于水云的自身辐射及反射太阳辐射。4.2~4.45 μm 波段下的背景辐射主要贡献为冰云的自身辐射。3~5 μm 波段下的背景辐射主要贡献来自于海面透过冰云的自身辐射、冰云的自身辐射及水云对太阳辐射的反射。图 11 为 3 个波段下目标与背景辐射强度差异以及目标所在像素处的局部信杂比。

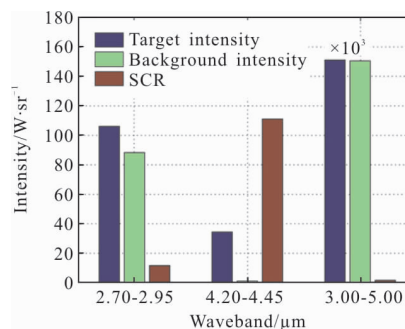


图 11 不同波段下目标与背景的辐射强度差异以及局部信杂比  
Fig.11 Radiation intensity difference between target and background under different bands and local SCR difference

由图 11 可知：大气屏蔽波段对目标的探测效能优于宽波段；4.2~4.45 μm 波段目标辐射强度最小，但与背景辐射强度差异最大，目标所在像素处的局部信杂比最大；2.7~2.95 μm 目标与背景辐射强度差异次之，局部信杂比为 11.34；3~5 μm 目标与背景辐射强度最大，但辐射强度差异最小，局部信杂比仅为 1.38，此波段下目标无法探测。

### 3.2 不同探测背景

为了分析背景变化对地球同步轨道红外成像系统目标探测能力的影响，图 12 仿真了目标位于 15 km 处，两个窄波段探测时，位于冰云、水云和无云背景下目标的多光谱成像结果预测。图 13 为不同背景下局部信杂比分布。

结合图 12 和图 13 可知：目标位于此高度处，两个窄波段均可实现冰云、水云和无云背景下的目标探测；2.7~2.95 μm 波段下，冰云背景辐射杂波较小且背景起伏较均匀，目标最易被探测；4.2~4.45 μm 波段下，无云背景，即海面背景下最易探测目标，水云背景次之，冰云背景最难探测。同时，水云背景下的背景杂波干扰严重，目标不易被探测。综上所述可知：针对不同的背景选择合理的探测波段有利于目标的高效探测。



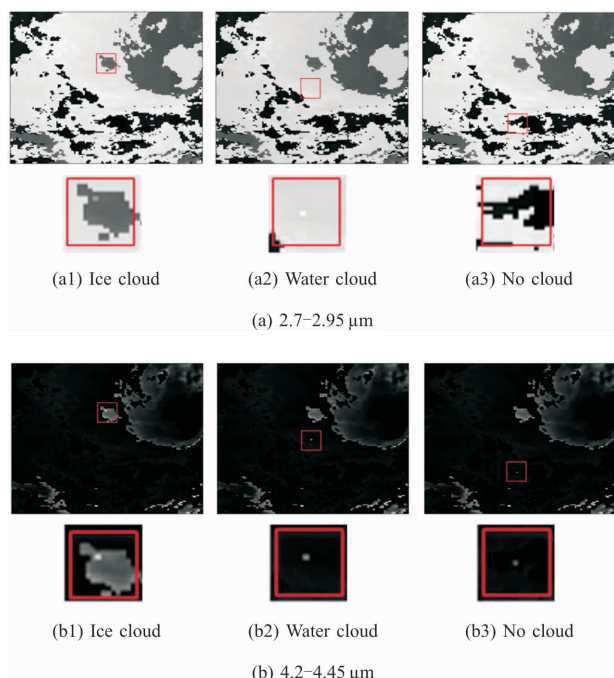


图 12 不同背景目标成像特征预测

Fig.12 Prediction of target imaging characteristics under different backgrounds

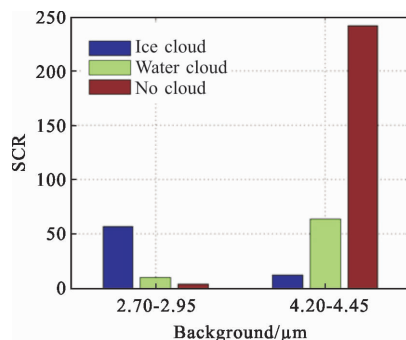


图 13 不同背景下局部信杂比分布

Fig.13 Local SCR distribution under different backgrounds

## 4 结 论

空中目标具有高速机动、战略突防和远程精确打击等特点,针对这类目标的广域、连续监视等光学探测需求,讨论了地球同步轨道预警卫星对飞机目标的探测性。文中利用遥感数据建立了海面云层复杂背景辐射模型,基于飞机尾焰的实测数据反演了尾焰的本征辐射特性。文中综合考虑了海面、云层背景、大气路径辐射及大气衰减对目标光学辐射特征的影响,建立飞机尾焰-海面、云层背景-环境大气-光学系统-成像探测器于一体的全数字化链路光

学辐射成像特征精确预测模型。采用局部信杂比分析了地球同步轨道预警卫星对空中目标的探测性,且仿真了不同探测条件下目标的成像特征。研究发现:大气屏蔽波段对目标的探测效能优于宽波段;针对不同的背景选择合理的探测波段有利于目标的高效探测。文中研究结果可为地球同步轨道卫星的探测效能分析及系统参数设计提供理论依据及数据支持。

## 参 考 文 献 :

- [1] Huang Fuyu, Shen Xueju, Li Gang. Influence of background radiation on space target detection in the long wave infrared range[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(8): 086402.
- [2] Huckridge D A, Ebert R, Lee S T, et al. Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIII—Analysis on the detection capability of the space based camera for the space debris[C]//SPIE, 2016, 9987: 99870Q.
- [3] Schweitzer C, Stein K, Wendelstein N. Evaluation of appropriate sensor specifications for space based ballistic missile detection[C]//SPIE, 2012, 8541: 966828.
- [4] Huang Da, Huang Shucai, Zhao Wei, et al. Selection of feature bands based on space-based detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(S1): 174–179. (in Chinese)
- [5] Liu Zunyang, Li Xiuhe. Study on working mechanism and detecting parameters of SBIRS–GEO early warning satellites [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(3): 363–368. (in Chinese)  
刘尊洋, 李修和. SBIRS–GEO 预警卫星工作机理与探测参数分析[J]. *激光与红外*, 2018, 48 (3): 363–368.
- [6] 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)  
丁国振, 张占月, 郭力闻, 等. SBIRS–GEO 卫星预警探测流程及信噪比阈值建模分析 [J]. *装备学院学报*, 2014(5): 78–82.
- [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)  
李小将, 金山, 廖海玲, 等. 美军 SBIRS GEO–1 预警卫星探测预警能力分析[J]. *激光与红外*, 2013, 43(1): 3–8.
- [8] Sun Chengming, Yuan Yan, Zhao Fei. Analysis of SNR for



- space-based imaging detection of space object [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1654–1659. (in Chinese)
- 孙成明, 袁艳, 赵飞. 空间目标天基成像探测信噪比分析 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1654–1659.
- [9] Descloitres J, Buriez J C, Parol F, et al. Polder observations of cloud bidirectional reflectances compared to a plane-parallel model using the international satellite cloud climatology project cloud phase functions [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1998, 103(D10): 11411.
- [10] Lou Shuli, Lv Junwei, Zhou Xiaodong. The calculation of infrared radiation of rough sea surface [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2011, 31(4): 196–199. (in Chinese)
- 娄树理, 吕俊伟, 周晓东. 粗糙海面的红外辐射计算[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(4): 196–199.
- [11] Retief S J P, Titterton D H, Richardson M A. Technologies for Optical Countermeasures IX –Aircraft plume infrared radiance inversion and subsequent simulation model [C]// SPIE, 2012, 8543: 85430P.
- [12] Holst Gerald C. *Electro-optical Imaging Systems Performance* [M]. Third Edition. America: JCD Publishing and SPIE Optical Engineering Press, 2002.
- [13] Lomheim T S, Milne E L, Kwok J D, et al. Performance/sizing relationships for a short-wave/mid-wave infrared scanning point-source detection space sensor [C]//Aerospace Conference. IEEE, 2002.
- [14] Yuan Hang, Wang Xiaorui, Guo Bingtao, et al. Performance analysis of the infrared imaging system for aircraft plume detection from geostationary orbit [J]. *Applied Optics*, 2019, 58: 1691–1698.
- [15] Lawrie D G, Lomheim T S. *Advanced Electro-Optical Space-Based Systems for Missile Surveillance* [M]. California: The Space Corporation, 2001.
- [16] Wang Xiaorui, *Electro-optical Imaging System: Modeling, Simulation, Testing and Evaluation* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2017: 9. (in Chinese)
- 王晓蕊. 光电成像系统: 建模、仿真、测试与评估[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2017: 9.