

〈制导与对抗〉

亚像元火点对红外预警卫星的辐射干扰特性

李文杰¹, 闫世强¹, 宋 畅², 吴亚宏¹, 王成良¹, 欧阳琰¹

(1. 空军预警学院, 湖北 武汉 430019; 2. 中国人民解放军第93117部队, 江苏 南京 211800)

摘要: 亚像元火点是红外预警卫星的辐射干扰源, 基于推导火点像元辐射强度方程, 对不同条件下的火点像元在 2.55~2.85 μm 波段和 4.19~4.48 μm 波段的辐射强度进行数值计算, 分析了影响火点像元辐射特性的因素。通过与 Titan IIIB 型火箭尾焰辐射特性进行对比分析并利用实际火点数据验证了亚像元火点的辐射干扰特性, 结果表明: 亚像元火点在 2.55~2.85 μm 波段和 4.19~4.48 μm 波段均能够对红外预警卫星的探测造成辐射干扰, 与火箭尾焰辐射特性的区别是大部分火点像元在 4.19~4.48 μm 波段具有更强的辐射强度, 结果可为提升红外预警卫星抗火点辐射干扰能力提供理论支撑。

关键词: 红外预警卫星; 辐射干扰; 火点像元; 尾焰

中图分类号: TN977 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2021)01-0073-06

Radiation Interference Characteristics of Sub-pixel Fire Points on Infrared Early Warning Satellite

LI Wenjie¹, YAN Shiqiang¹, SONG Chang², WU Yahong¹, WANG Chengliang¹, OUYANG Yan¹

(1. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China;

2. Unit 93117 of the Chinese People's Liberation Army, Nanjing 211800, China)

Abstract: The sub-pixel fire point is the radiation interference source of the infrared early warning satellite (IEWS). Based on the derivation of the radiation intensity equation of the fire pixel, the radiation intensity of fire point pixels in the 2.55-2.85 μm and 4.19-4.48 μm wavebands under different conditions are numerically calculated, and the factors affecting the radiation characteristics of the fire pixel are analyzed. We compared and analyzed the radiation characteristics of the tail flame of the Titan IIIB rocket and verified the actual fire data. The results showed that the sub-pixel fire points in 2.55-2.85 μm and 4.19-4.48 μm wavebands can cause radiant interference to IEWS. Moreover, the radiation characteristics of the rocket tail flames were different in that most fire pixels showed stronger radiation intensities in the 4.19-4.48 μm waveband. The results can provide theoretical support for improving the ability of IEWS to resist the interference of fire-point radiation.

Key words: infrared early warning satellite, radiation interference, fire pixel, tail flame

0 引言

红外预警卫星主要在 2.7 μm 波段和 4.3 μm 波段对导弹助推段的尾焰红外辐射进行探测, 这两个波段可以降低地球背景辐射对探测的干扰。地表火点同样具有强烈的红外辐射, 会对红外预警卫星的探测造成干扰, 例如森林大火、草原火灾、火山爆发等^[1], 因此对地表火点在红外预警卫星探测波段的辐射特性

进行研究十分必要。

部分学者对地表火点在吸收波段的辐射特性进行了相关的研究工作, 江珊^[1]等学者对林火与背景辐射亮度进行仿真分析, 证明林火在短波红外波段与背景辐射差异较大; 宋文韬^[2]等学者利用 FY-3A 卫星数据反演火山爆发在 2.7 μm 和 4.3 μm 波段的辐射特性, 证明火山辐射在 4.3 μm 波段与背景具有强烈的差异; 黄景雨^[3]学者对林火虚警源在红外遥感图像的成像特

收稿日期: 2020-02-04; 修订日期: 2020-11-17.

作者简介: 李文杰 (1991-), 男, 博士研究生, 主要从事预警装备运用研究工作。E-mail: kfcvs@qq.com.

通信作者: 王成良 (1975-), 男, 副教授, 主要从事红外光电探测技术研究工作。E-mail: bingler@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (61503410)。

性进行了建模，并对虚警源的检测方法进行了研究。上述对红外预警卫星探测波段火点辐射特性的研究均基于地表火点辐射与地球背景辐射的亮度差异，但缺少与火箭尾焰在相同条件下的辐射特性进行对比分析，无法充分证明地表火点对红外预警卫星的辐射干扰。

在红外预警卫星探测器中地表火点通常以亚像元的形式存在，本文通过构建火点像元的辐射方程，对 2.55~2.85 μm 波段和 4.19~4.48 μm 波段内火点像元的辐射强度进行数值计算，分析影响火点像元辐射特性的因素。在此基础上，通过与火箭尾焰的辐射强度进行对比分析并利用中分辨率成像光谱仪 (Moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 火点数据进行验证，分析了火点像元在不同波段对红外预警卫星的辐射干扰特性。

1 火点像元辐射强度方程

地表火点的面积通常小于探测器单个像元对应的地表面积，因此地表火点通常以亚像元的形式存在，即将火点像元看作是由火点和常温背景组成的混合像元，火点像元的辐射组成如图 1 所示。

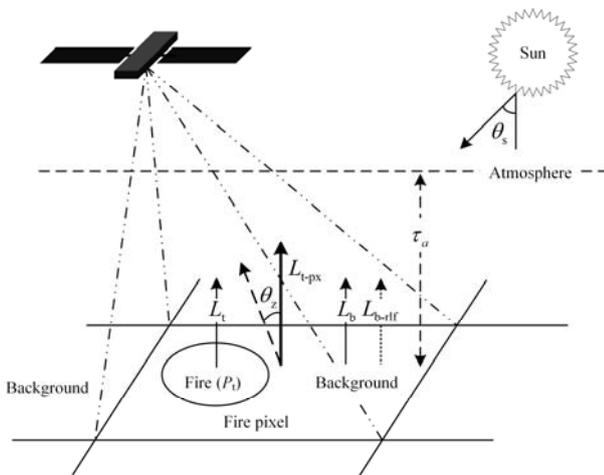


图1 火点像元的辐射组成

Fig.1 Radiation composition of fire pixel

由于探测器像元对应的地表空间尺度相对观测距离很小，因此可假设地表火点和常温背景均服从朗伯定律，火点像元对应地表区域的光谱辐射亮度可表示为^[4]：

$$L_{t\text{-px}}(\lambda) = P_1 L_t(\lambda) + (1 - P_1)[L_b(\lambda) + L_{b\text{-rif}}(\lambda)] \quad (1)$$

式中： $L_t(\lambda)$ 为地表火点的光谱辐射亮度； $L_b(\lambda)$ 为地表背景的光谱辐射亮度； $L_{b\text{-rif}}(\lambda)$ 为地表反射太阳辐射的光谱辐射亮度； P_1 表示地表火点占像元的比例，等于地表火点的面积 S_1 和探测器像元对应的地表分

辨率 S_d 的比值， S_d 随着像元的位置以及扫描角度的不同是变化的。

由朗伯定律可知，单位面积地表火点向半球空间的光谱辐射亮度可表示为：

$$L_t(\lambda) = \frac{W_t(\lambda)}{\pi} \quad (2)$$

地表火点的光谱辐射出射度可表示为：

$$W_t(\lambda) = \frac{\bar{\varepsilon}_t c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T_t} - 1)} \quad (3)$$

式中： $\bar{\varepsilon}_t$ 为地表火点的平均发射率，设 $\bar{\varepsilon}_t = 0.9$ ； $c_1 = 3.7418 \times 10^8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^4$ （第一辐射常数）； $c_2 = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m}\cdot\text{K}$ （第二辐射常数）； T_t 表示地表火点的温度，K。

同理可得单位面积地表背景的光谱辐射亮度可表示为：

$$L_b(\lambda) = \frac{\bar{\varepsilon}_b c_1}{\pi \lambda^5 (e^{c_2/\lambda T_b} - 1)} \quad (4)$$

式中： $\bar{\varepsilon}_b$ 为常温背景的平均发射率，设 $\bar{\varepsilon}_b = 0.7$ ； T_b 为地表背景温度，K。

地表背景反射太阳辐射的光谱辐射亮度可由下式进行计算^[5]：

$$L_{b\text{-rif}}(\lambda) = \frac{\bar{\rho}_b \tau_a(\lambda, \theta_s) E_0(\lambda) \cos \theta_s}{\pi d_s^2} \quad (5)$$

式中： $\bar{\rho}_b = 1 - \bar{\varepsilon}_b$ ，为地表背景的平均反射率； θ_s 是火点位置的太阳天顶角； $\tau_a(\lambda, \theta_s)$ 为太阳辐射到达地表的路径大气光谱透过率； $E_0(\lambda)$ 为太阳在地球大气层上界的光谱辐照度； d_s 为日地天文距离（单位 AU），本文的日地距离设为 1 AU。

其中太阳在地球大气层上界的光谱辐照度可表示为：

$$E_0(\lambda) = \frac{W_s(\lambda) A_s}{4\pi D_s^2} = W_s(\lambda) \frac{R_s^2}{D_s^2} \quad (6)$$

式中： $W_s(\lambda)$ 为太阳的光谱辐射出射度，太阳的等效黑体温度 $T_s = 5772 \text{ K}$ ^[6]； A_s 为太阳的表面积； R_s 为太阳半径， $R_s = 6.955 \times 10^5 \text{ km}$ ； D_s 为太阳和地球的平均距离， $D_s = 1.496 \times 10^8 \text{ km}$ 。

火点像元同时具有面目标和点目标的特性，因此火点像元朝卫星方向经过大气衰减后的光谱辐射强度可表示为：

$$I_{t\text{-px}}(\lambda) = L_{t\text{-px}}(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda, \theta_z) \cdot S_d(\theta_z) \cdot \cos \theta_z \quad (7)$$

式中： $\tau_a(\lambda, \theta_z)$ 表示火点位置朝卫星方向的路径大气光谱透过率，可通过 MODTRAN 计算得到； θ_z 表示

火点位置的卫星天顶角; $S_d(\theta_z)$ 表示探测器像元中火点位置对应的地表分辨率。

对式(7)进行积分可得到火点像元在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段范围的辐射强度:

$$I_{t\text{-px}}(\lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{t\text{-px}}(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

通过推导红外预警卫星探测器像元中的地表火点像元辐射强度方程,为进一步分析地表火点的辐射干扰特性奠定了基础。

2 火点像元辐射特性影响因素分析

上述分析表明火点像元的辐射强度与火点像元参数 T_t 、 T_b 、 S_t 、 θ_s 、 θ_z 存在关系,为进一步了解影响火点像元辐射强度的因素,下文依照单一变量原则对不同条件下的火点像元辐射强度进行数值计算,表1为火点像元辐射参数的参考值与范围设定。

表1 火点像元参数的参考值与范围

| | T_t/K | T_b/K | S_t/km^2 | $\theta_s/^\circ$ | $\theta_z/^\circ$ |
|-------|----------|---------|------------|-------------------|-------------------|
| Value | 800 | 300 | 0.1 | 30 | 30 |
| Range | 400-1600 | 280-320 | 0.01-1 | 0-80 | 0-80 |

以 SBIRS-GEO 红外预警卫星^[7]为例,扫描相机和凝视相机单个像元的角分辨率分别为 $\Phi_{sc}=3.134 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 和 $\Phi_{st}=2.761 \times 10^{-5} \text{ rad}$,假设扫描方向的角分辨率与像元分辨率一致,则扫描相机和凝视相机的星下点地表分辨率分别为 $S_{sc}=1.258 \text{ km}^2$ 和 $S_{st}=0.978 \text{ km}^2$ 。假设地球为半径 6371 km 球体,通过计算不同火点位置对应的卫星天顶角,再利用参考文献[8]中的方法对探测器单个像元的地表分辨率进行计算,得到火点位置的卫星天顶角与探测器像元对应的地表分辨率关系如图2所示。

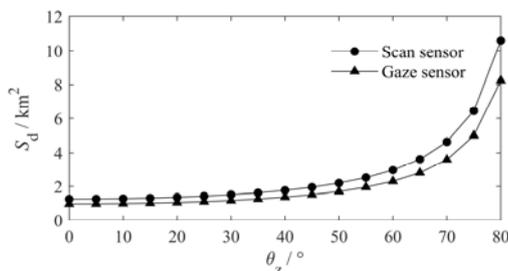


图2 卫星天顶角与探测器像元对应的地表分辨率关系

Fig.2 The relationship between the satellite zenith angle and the surface resolution of the detector

红外预警卫星探测波段^[9]设为短波红外波段 2.55~2.85 μm 和中波红外波段 4.19~4.48 μm ,利用 MODTRAN 计算火点像元在短波红外波段和中波红

外波段朝卫星方向的路径大气平均透过率,大气模式为 1976 年美国标准大气,得到火点位置的卫星天顶角与路径大气平均透过率的关系如图3所示。

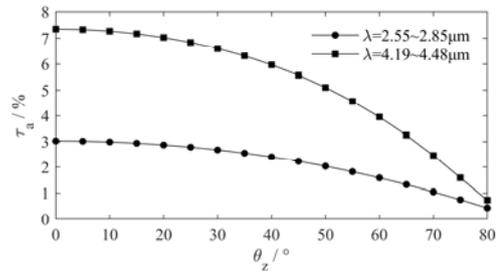


图3 卫星天顶角与路径大气平均透过率的关系

Fig.3 The relationship between satellite zenith angle and path average atmospheric transmittance

通过对火点像元参数范围内的辐射强度进行数值计算,得到在短波红外波段和中波红外波段,扫描相机和凝视相机中火点像元辐射强度的平均差值比分别为 0.92%和 0.74%,因此扫描相机和凝视相机中的火点像元辐射强度差异可以忽略不计。

不同火点像元参数下的辐射强度数值计算结果如图4所示,结果可见火点温度、火点面积以及火点位置的卫星天顶角对火点像元的辐射强度存在较大影响,而地表背景的温度以及太阳天顶角的大小对火点像元的辐射强度影响较小。其中,地表火点在不同波段的辐射干扰特性与火点温度密切相关,大部分条件下火点像元在中波红外波段比短波红外波段具有更高的辐射强度,当火点温度较高时,火点像元在短波红外波段具有比中波红外波段更高的辐射强度,原因由维恩位移定律可知,火点像元光谱辐射的峰值对应的波长随火点温度的增大而逐渐减小。此外,火点像元的辐射强度随火点位置的卫星天顶角增大而减小,表明相同条件下的火点像元,越接近卫星星下点位置则具有更强的辐射干扰特性。

3 火点像元辐射干扰分析

3.1 对比分析

为分析火点像元对红外预警卫星的辐射干扰特性,选择文献[10]提供的 Titan III B 型运载火箭尾焰辐射强度数据进行对比分析,图5所示为 Titan III B 型火箭在飞行高度为 18 km,观测角为 48°时的尾焰光谱辐射强度。经计算大气衰减后,在 2.55~2.85 μm 波段的辐射强度为 574.54 $\text{kW}\cdot\text{sr}^{-1}$,在 4.19~4.48 μm 波段的辐射强度为 186.31 $\text{kW}\cdot\text{sr}^{-1}$,可见 Titan III B 型火箭尾焰在短波红外波段具有更明显的辐射特性。

为保证对比分析条件的一致性,同样将红外预警卫星相对火点位置的观测角设为 48°,即火点位置的

卫星天顶角为 42° 。通过数值计算得到在短波红外波段和中波红外波段，与 Titan III B 型火箭尾焰辐射强度相等的火点温度和火点面积曲线如图 6 所示。当火点的温度和火点面积在曲线上方区域时，表示火点像元的辐射强度大于 Titan III B 型火箭尾焰的辐射强度。通过比较发现在相同条件下，火点像元在中波红外波段更容易与 Titan III B 型火箭尾焰具备相似的辐射特性，因此采用短波红外波段可以减少由地表火点辐射干扰带来的影响。

3.2 实例验证

采用 MODIS 检测到的火点数据，通过反演火点参数以验证分析火点像元的辐射干扰特性。MODIS 火点数据检测主要利用 21 通道 ($3.929\sim 3.989\ \mu\text{m}$)

和 31 通道 ($10.780\sim 11.280\ \mu\text{m}$)，这两个通道的分辨率均为 $1\ \text{km}$ 。火点温度和火点面积可通过联立式(9)和式(10)得到：

$$L_{t21} = \frac{A_t}{S_{m\text{-px}}} \cdot L(\lambda_{21}, T_t) + (1 - \frac{A_t}{S_{m\text{-px}}}) \cdot L(\lambda_{21}, T_b) \quad (9)$$

$$L_{t31} = \frac{A_t}{S_{m\text{-px}}} \cdot L(\lambda_{31}, T_t) + (1 - \frac{A_t}{S_{m\text{-px}}}) \cdot L(\lambda_{31}, T_b) \quad (10)$$

式中： L_{t21} 和 L_{t31} 分别为火点像元在 21 通道和 31 通道的光谱辐射亮度； λ_{21} 和 λ_{31} 分别为 21 通道和 31 通道的中心波长； $S_{m\text{-px}}$ 为 MODIS 像元对应的地表空间分辨率。

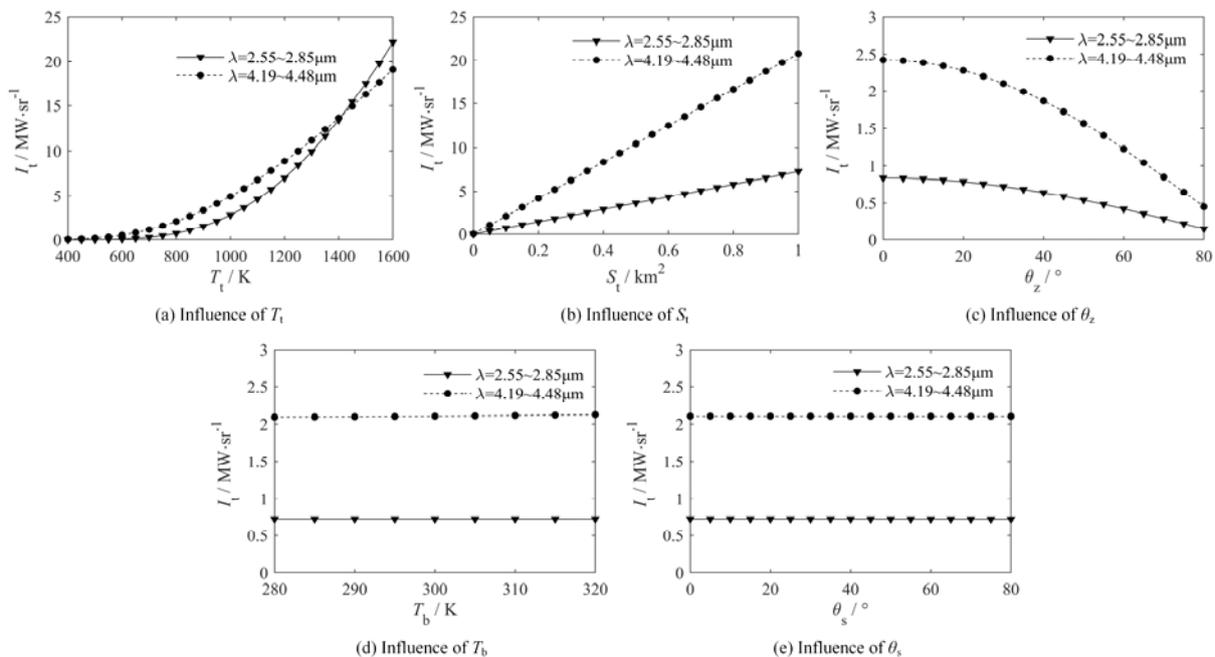


图4 不同火点像元参数对辐射强度的影响

Fig.4 Effect of different parameter changes on radiant intensity of fire pixel

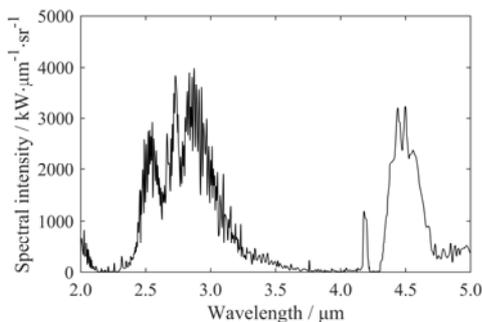


图5 Titan III B 型火箭尾焰在飞行高度 $18\ \text{km}$ 、观测角为 48° 时的辐射强度

Fig.5 Spectra of Titan III B rocket tail flame at $18\ \text{km}$ and viewing aspect of 48°

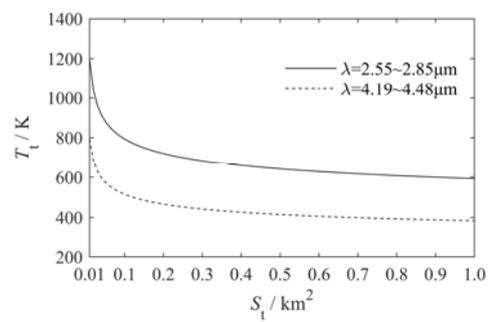


图6 与 Titan III B 型火箭尾焰辐射强度相同的火点温度和火点面积曲线

Fig.6 Critical temperature and area of surface fire point equal to radiant intensity of Titan III B rocket tail flame

MODIS数据的获取时间范围为2018年8月全月, 假设红外预警卫星的星下点经度为西经100°, 经计算探测器最大覆盖范围内的火点分布及火点参数统计如图7所示, 共有火点11480处。根据统计结果可见, 火点温度主要集中在450~1200 K范围, 占总数的96.57%; 火点面积大多数小于0.1 km², 占总数的98.94%; 火点位置的卫星天顶角主要集中在36°~74°, 占总数的98.13%。

将火点温度、火点面积、火点位置的卫星天顶角参数代入火点像元辐射方程, 得到红外预警卫星探测波段火点像元的辐射强度统计结果如表2所示。在短波红外波段和中波红外波段, 火点像元辐射强度大于Titan III B型火箭在飞行高度为18 km、观测角为48°时的尾焰辐射强度的数量分别是45处和723处, 占总数的比例为0.392%和6.298%, 其中火点像元辐射强度的最大值分别是同波段尾焰辐射强度的9.7倍和33.2倍, 证明了亚像元火点能够对红外预警卫星的探测造成辐射干扰。由统计结果中的平均值和中位数可以看出, 大多数火点像元在中波红外波段比短波红外波段具有更明显的辐射特性, 这一辐射特性区别于火箭尾焰, 可利用其对火点像元的辐射干扰进行抑制。

4 结论

红外预警卫星探测背景的辐射环境复杂, 本文针对亚像元火点的辐射干扰特性展开研究。在分析和推导火点像元辐射强度方程的基础上, 以SBIRS-GEO卫星为例, 通过对短波红外波段2.55~2.85 μm和中波红外波段4.19~4.48 μm波段的火点像元辐射强度进行数值计算, 分析发现火点温度、火点面积和火点位置的卫星天顶角对火点像元辐射特性的影响较大。下一步, 为研究亚像元火点对红外预警卫星的辐射干扰特性, 采用Titan III B型火箭尾焰进行对比分析, 并利用MODIS火点数据反演得到的火点参数代入辐射方程进行验证, 结果表明: 亚像元火点在短波红外波段和中波红外波段均能够对红外预警卫星的探测造成辐射干扰, 并且在中波红外波段的辐射特性较强。然而火箭尾焰则在短波红外波段具有更明显的辐射特性, 因此可利用亚像元火点与火箭尾焰的不同辐射特性对其辐射干扰特性进行识别和抑制。本文研究方法具有一定的普适性, 结果可为提升红外预警卫星抗辐射干扰能力提供理论支撑。

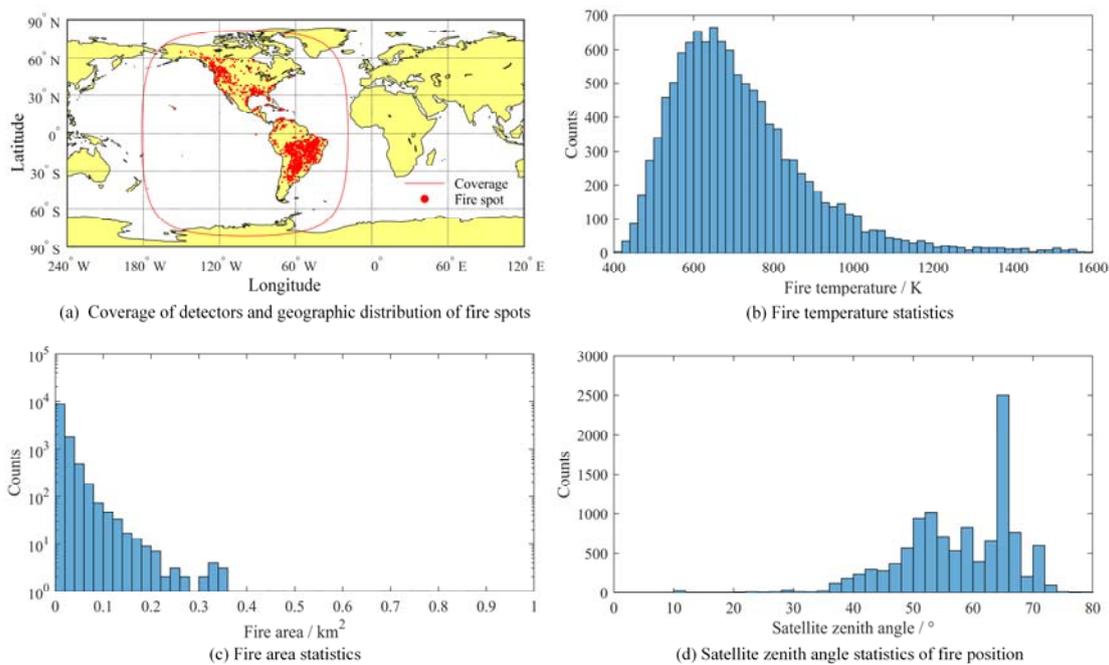


图7 探测器覆盖范围内的火点分布及火点参数统计

Fig.7 Fire distribution and fire parameter statistics within the coverage of the detector

表2 火点像元辐射强度统计

Table 2 Statistics of fire pixel radiation intensity

| Wavebands/μm | Minimum/W·sr ⁻¹ | Maximum/W·sr ⁻¹ | Average/W·sr ⁻¹ | Median/W·sr ⁻¹ |
|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 2.55-2.85 | 2.771 × 10 ² | 6.197 × 10 ⁶ | 2.456 × 10 ⁴ | 7.014 × 10 ³ |
| 4.19-4.48 | 3.412 × 10 ³ | 5.576 × 10 ⁶ | 7.449 × 10 ⁴ | 4.351 × 10 ⁴ |

参考文献:

- [1] 江珊, 巩彩兰, 胡勇, 等. 短波红外吸收带林火与背景辐射亮度比较分析[J]. *大气与环境光学学报*, 2014, **9**(3): 223-228.
JIANG Shan, GONG Cailan, HU Yong, et al. Comparison of radiation characteristics of forest fire and background in short wave infrared absorption bands[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, **9**(3): 223-228.
- [2] 宋文韬, 胡勇, 刘丰轶, 等. 基于气象卫星云图的红外吸收带火山特征分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, **39**(1): 73-78.
SONG Wentao, HU Yong, LIU Fengyi, et al. Analysis of infrared absorption band for volcano based on meteorological satellite cloud image[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, **39**(1): 73-78.
- [3] 黄景雨. 林火虚警源红外成像特征建模及检测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
HUANG Jingyu. Detection Method of Forest Fire False Alarm Source with Infrared Imaging Feature Modeling [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [4] 贺宝华, 陈良富, 陶金花, 等. 基于观测几何的环境卫星红外相机遥感火点监测算法[J]. *红外与毫米波学报*, 2011, **30**(2): 104-108.
HE Baohua, CHEN Liangfu, TAO Jinhua, et al. A contextual fire detection algorithm based on observation geometry for HJ-1B-IRS[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011, **30**(2): 104-108.
- [5] Hakan Oğuz. A Software tool for retrieving land surface temperature from aster imagery[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2015, **21**(4): 471-482.
- [6] Hertel I V, Schulz C. *Atoms, Molecules and Optical Physics: Atoms and Spectroscopy*[M]. Springer, 2015: 34-37.
- [7] 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.
LIU Zunyang, LI Xiuh. Study on working mechanism and detecting parameters of SBIRS-GEO early warning satellites[J]. *Laser & Infrared*, 2018, **48**(3): 363-368.
- [8] 朱广斌, 何大雄. 卫星扫描辐射计的地面分辨率的计算[J]. *中国空间科学技术*, 1986(1): 32-39.
ZHU Guangze, HE Daxiong. The calculation of the ground resolution of the scanning radiometer for a satellite[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 1986(1): 32-39.
- [9] 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.
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.
- [10] Simmons F S. *Rocket Exhaust Plume Phenomenology*[M]. EI Segundo: The Aerospace Press and American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000: 105-112.
-
- (上接第 59 页)
- [2] 刘俊良, 李永富, 张春芳, 等. 基于 APD-PIN 结电容平衡电路的门控单光子探测器[J]. *红外与激光工程*, 2015, **44**(11): 3181-3185.
LIU Junliang, LI Yongfu, ZHANG Chunfang, et al. Single-photon detector based on GPQC with balanced APD-PIN junction capacitance[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(11): 3181-3185.
- [3] 郑丽霞. 盖革模式雪崩光电二极管阵列读出电路的研究与实现[D]. 南京: 东南大学, 2017.
ZHENG Lixia. Research and Implementation of GM-avalanche Photodiode Array Readout Circuit[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [4] Haitz R H. Model for the electrical behavior of microplasma[J]. *Journal of Applied Physics*, 1964, **35**(5): 1370-1376.
- [5] Haitz R H. Mechanisms contributing to the noise pulse rate of avalanche diodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 1965, **36**(10): 3123-3131.
- [6] Cova S, Longoni A, Andreoni A. Towards picoseconds resolution with single-photon avalanche diodes[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1981, **52**(3): 408-412.
- [7] R H Haitz. Model for the electrical behavior of microplasma[J]. *Journal of Applied Physics*, 1964, **35**(5): 1370-1376.
- [8] Tisa S, Zappa F, Tosi A, et al. Electronics for single photon avalanche diode arrays[J]. *Sensors and Actuators*, 2007, **140**(1): 113-122.