

# 不同场景的天基紫外背景杂波仿真计算

徐菲菲<sup>1,2</sup> 胡 勇<sup>1</sup> 尹 球<sup>3</sup> 尹达一<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

<sup>3</sup>上海市卫星遥感与测量应用中心, 上海 201199

**摘要** 在天基紫外探测系统中,定量地估计由地气背景浮动引起的杂波辐射有利于对不同场景探测通道(包括中心波长和光谱范围)的有效选择,提高对空间目标的综合探测性能。从空间信号传输的角度出发,在290~400 nm的“紫外窗口”区建立了不同场景空间杂波辐射模型,并利用该模型分析了空间背景杂波辐射亮度的主要影响因素。在可能的目标辐射特性与地气背景杂波水平下,对杂波影响下的系统探测性能进行了有效估算。结果表明:在晴空探测条件下,探测系统的中心波长和光谱范围应分别选为300 nm和297~306 nm,而在完全充满卷云的视场,探测系统的中心波长和光谱范围应分别选为299 nm和296~303 nm。

**关键词** 大气光学; 杂波辐射; 仿真; 探测器; 紫外; 目标探测

中图分类号 TN23

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0601002

## Modeling Calculation for Space-Based Ultraviolet Clutter Radiance from Different Scenes

Xu Feifei<sup>1,2</sup> Hu Yong<sup>1</sup> Yin Qiu<sup>3</sup> Yin Dayi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup>Shanghai Center for Satellite Remote Sensing Applications, Shanghai 201199, China

**Abstract** For the space-based ultraviolet (UV) detection system, quantitatively estimating the clutter radiance from the fluctuations of earth-atmospheric background is beneficial to effectively select the detecting channels (including middle-wavelength and spectral-range) in different scenes, and can improve the comprehensively detecting performance for the space target. Based on the space signal transfer, the space clutter radiance models in different scenes are established in the UV window of 290~400 nm. By means of the models, the main influence factors for the space background clutter radiance are analyzed. In the level of the possible target radiation characteristics and earth-atmospheric background clutter radiance, the detecting performance of system influenced by the clutter is effectively estimated. The results show that the middle-wavelength and spectral-range of detecting system should be 300 nm and 297~306 nm for clear sky, but 299 nm and 296~303 nm respectively for the field of cirrus clouds.

**Key words** atmospheric optics; clutter radiance; simulation; detectors; ultraviolet; target detection

**OCIS codes** 010.5620; 010.1290; 270.2500; 260.7190; 040.7190

## 1 引 言

随着遥感技术的不断进步,使用天基紫外(UV)传感器探测空间目标的研究受到越来越多的关注<sup>[1-4]</sup>。由于紫外辐射不似红外辐射易受大气中含量变化较为明显的水汽和二氧化碳的影响,同时对紫外辐射具有强

收稿日期: 2014-12-04; 收到修改稿日期: 2015-01-21

基金项目: 民用航天“十二五”预先研究项目(D040103)、上海技术物理研究所创新专项(Q-DX-76)

作者简介: 徐菲菲(1986—),女,博士研究生,主要从事光学信号探测等方面的研究。E-mail: xufei048@163.com

导师简介: 尹 球(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事大气辐射传输方面的研究。E-mail: yinqiu@cma.gov.cn

烈吸收作用的臭氧与氧气在大气中的含量相对稳定,因此紫外传感器在目标探测上比红外传感器有更大的优势<sup>[5-7]</sup>。天基紫外系统在探测目标的应用中具有其独特的特性<sup>[8-9]</sup>,相较于较为成熟的红外空间目标探测装置,紫外目标探测技术仍处于起步阶段<sup>[10]</sup>。天基紫外探测系统以地球和大气作为背景,背景辐射的变化将影响系统的有效动态范围<sup>[11-12]</sup>。在紫外探测系统设计过程中应尽量使得在探测波段内目标的信号达到最强,同时降低地气背景噪声对空间目标识别的干扰。在紫外探测系统中主要的干扰源为杂波。杂波概念最初是在雷达领域中非目标返回的能量中被提出的,这里的杂波指的是来自地气背景辐亮度在二维空间上的差异。由于地气背景的复杂性与多样性,在传感器设计过程中背景杂波辐射的波动很难被有效抑制,直接影响空间目标探测结果的准确性。在紫外波段内,背景杂波的存在增加了对目标探测的复杂性,以往的探测系统没有考虑背景杂波的影响,因此有很大的局限性。

目前,对于紫外探测技术的研究多集中在对于地气背景辐射特性的分析以及不同杂波度量尺度对成像系统性能影响的研究,而从信号传输的角度研究较少。经系统地分析可知,200~290 nm的“日盲区”紫外波段由于受平流层以下臭氧和氧气强烈的吸收,近地表的紫外辐射很微弱,而在高空对目标的识别几乎不受地气背景杂波多样性和复杂性的影响,在该光谱范围内有利于发现高空目标<sup>[13]</sup>,其探测概率高达99%<sup>[5]</sup>。而在290~400 nm的“紫外窗口”,由于大气散射的强烈作用将在视场中形成均匀的亮背景,而来自近地表目标的辐射将在亮背景上形成暗点,同样产生良好的对比<sup>[14]</sup>,但在该光谱范围目标的辐射特性受地气背景辐射的影响较大,在探测系统设计过程中需要衰减并消除其他信号干扰以降低背景噪声的影响<sup>[15]</sup>。因此合理地分析和估计该波段范围内地气背景杂波辐亮度,能进一步实现对近地表目标的有效探测。

本文基于天基紫外大气传输和背景特性,分别构建了晴空与充满卷云视场两种场景下的地气背景杂波辐射模型,并利用该模型对紫外系统中不同场景下的杂波辐亮度进行了计算,最后对杂波影响下的紫外系统目标探测性能进行了评估并初步分析了天基紫外探测系统的最佳探测通道。

## 2 空间杂波辐射计算模型

紫外波段信息的传递过程与可见光基本相似,均可采用 Matthew Hanson 的表达式<sup>[16]</sup>来表示。经相关的研究分析可知,在紫外波段大气层外探测器接收到来自地气背景的辐射能量主要由两部分构成,包括来自背景(地球或云)表面的反射项以及太阳辐射的多次散射项,而在280 K~300 K的常规地表温度范围内,来自地表发射项、大气内部热辐射项以及大气热散射项的能量几乎不存在。图1显示了天基紫外探测系统接收到的背景能量的辐射传输过程。

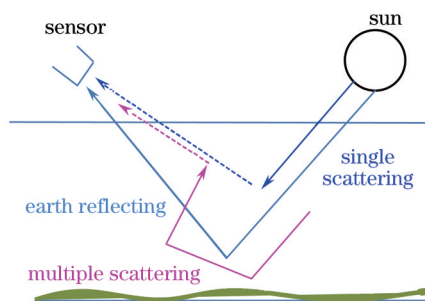


图1 紫外辐射传输贡献

Fig.1 Radiative transfer contributions in UV

在构建地气系统杂波辐射计算模型时,取两种极限条件(即晴空和充满不透明卷云的视场)进行分析,其他所有情况的杂波辐射处于这两种极限条件的辐射能量之间。则两种极限条件下的紫外波段地气背景辐射传输方程可简化为

1) 在晴空条件下

$$L_{b,\Delta\lambda} = \int_{\Delta\lambda} \left( \frac{\rho_{e,\lambda}}{\pi} \cdot T_{d,\lambda} \cdot E_{sun,\lambda} \cdot T_{u_{0-H},\lambda} + L_{solar\_scat,\lambda} \right) d\lambda, \quad (1)$$

2) 在充满卷云的视场条件下

$$L_{b,\Delta\lambda} = \int_{\Delta\lambda} \left( \frac{\rho_{e,\lambda}}{\pi} \cdot T_{d,\lambda} \cdot E_{\text{sun},\lambda} \cdot T_{u_{h_c \rightarrow H},\lambda} + L_{\text{solar\_scat},\lambda} \right) d\lambda, \quad (2)$$

式中  $L_{b,\Delta\lambda}$  为来自背景总的辐亮度,其中  $\lambda$  代表对应的波长位置,  $\Delta\lambda$  代表光谱积分区间,  $b$  代表地气背景,  $E_{\text{sun},\lambda}$  为大气层外太阳光谱辐照度<sup>[17]</sup>,  $\rho_{e,\lambda}$  和  $\rho_{c,\lambda}$  分别为地表和云表的光谱反照率,其中  $e$  代表地表,  $c$  代表云表,  $T_d = \exp[-\tau_\lambda / \cos(90 - \theta_s)]$ , 为到达地表或云表的大气下行透射率,与太阳高度角  $\theta_s$  有关,其中  $d$  代表下行方向,  $T_u$  为大气上行透射率( $T_{u_{0 \rightarrow H},\lambda}$  表示从地表到探测器,  $H$  代表大气层顶海拔高度,一般取 100 km,  $T_{u_{h_c \rightarrow H},\lambda}$  表示从云表到探测器,  $h_c$  代表云顶海拔高度),其中  $u$  代表上行方向,  $L_{\text{solar\_scat},\lambda}$  为探测器接收到的地表或云表与大气之间的太阳多次散射项。

地气背景空间杂波噪声是背景、探测器位置及系统特性综合作用的结果<sup>[18]</sup>。在紫外波段天基探测系统中的杂波主要来自地气背景空间的不均匀以及视线运动引起的不同场景辐亮度的变化,其对探测目标的区分产生干扰。对地气背景各因素随机浮动引起的背景辐亮度的变化进行统计,得到的标准差  $\sigma_b$  反映背景辐射的浮动程度,而总的辐射方差  $\sigma_b^2$  即为地气背景杂波辐亮度。在局部平稳大气的假设条件下  $\sigma_b^2$  主要来自地表反照率  $\rho_s$  差异  $\sigma_{\rho_s}$ 、大气水平能见度  $\nu$  波动  $\sigma_\nu$ 、太阳高度角  $\theta_s$  变化  $\sigma_{\theta_s}$ 、视线方向的观测天顶角  $\theta_v$  变化  $\sigma_{\theta_v}$ 、观测目标在大气层中的海拔高度  $h$  变化  $\sigma_h$ 、卷云反照率  $\rho_c$  差异  $\sigma_{\rho_c}$  以及卷云顶海拔高度  $h_c$  变化  $\sigma_{h_c}$ 。晴空和充满卷云视场两种极端场景的杂波辐亮度则可由各自扰动源的贡献叠加得到,则两种场景下的杂波辐射模型的计算公式如下:

1) 晴空场景的杂波辐亮度为

$$\sigma_b^2 = \left( \frac{\partial L_b}{\partial \rho_s} \right)^2 \sigma_{\rho_s}^2 + \left( \frac{\partial L_b}{\partial \nu} \right)^2 \sigma_\nu^2 + \left( \frac{\partial L_b}{\partial \theta_s} \right)^2 \sigma_{\theta_s}^2 + \left( \frac{\partial L_b}{\partial \theta_v} \right)^2 \sigma_{\theta_v}^2 + \left( \frac{\partial L_b}{\partial h} \right)^2 \sigma_h^2, \quad (3)$$

式中等号右边的第一项来自地表的贡献,第二项来自大气的贡献,后三项来自于太阳、传感器、探测目标之间的几何位置的贡献。

$$\frac{\partial L_b}{\partial \rho_s} = \int_{\Delta\lambda} \left( \frac{1}{\pi} \cdot T_{d,\lambda} \cdot E_{\text{sun},\lambda} \cdot T_{u_{0 \rightarrow H},\lambda} + \frac{\partial L_{\text{solar\_scat},\lambda}}{\partial \rho_s} \right) d\lambda, \quad (4)$$

$$\frac{\partial L_b}{\partial \nu} = \int_{\Delta\lambda} \left[ \frac{\rho_{e,\lambda}}{\pi} \cdot E_{\text{sun},\lambda} \cdot (T_{u_{0 \rightarrow H},\lambda} \cdot \frac{\partial T_{d,\lambda}}{\partial \nu} + T_{d,\lambda} \cdot \frac{\partial T_{u_{0 \rightarrow H},\lambda}}{\partial \nu}) + \frac{\partial L_{\text{solar\_scat},\lambda}}{\partial \nu} \right] d\lambda, \quad (5)$$

$$\frac{\partial L_b}{\partial \theta_s} = \int_{\Delta\lambda} \left( \frac{\rho_{e,\lambda}}{\pi} \cdot E_{\text{sun},\lambda} \cdot \frac{\partial T_{d,\lambda}}{\partial \theta_s} \cdot T_{u_{0 \rightarrow H},\lambda} + \frac{\partial L_{\text{solar\_scat},\lambda}}{\partial \theta_s} \right) d\lambda, \quad (6)$$

$$\frac{\partial L_b}{\partial \theta_v} = \int_{\Delta\lambda} \left( \frac{\rho_{e,\lambda}}{\pi} \cdot E_{\text{sun},\lambda} \cdot T_{d,\lambda} \cdot \frac{\partial T_{u_{0 \rightarrow H},\lambda}}{\partial \theta_v} + \frac{\partial L_{\text{solar\_scat},\lambda}}{\partial \theta_v} \right) d\lambda, \quad (7)$$

$$\frac{\partial L_b}{\partial h} = \int_{\Delta\lambda} \left( \frac{\rho_{e,\lambda}}{\pi} \cdot E_{\text{sun},\lambda} \cdot T_{d,\lambda} \cdot T_{u_{0 \rightarrow H},\lambda} + \frac{\partial L_{\text{solar\_scat},\lambda}}{\partial h} \right) d\lambda, \quad (8)$$

(4)~(8)式分别对应(3)式等号右边各项具体的计算公式。

2) 完全充满视场的卷云场景的杂波辐亮度为

$$\sigma_b^2 = \left( \frac{\partial L_b}{\partial \rho_c} \right)^2 \sigma_{\rho_c}^2 + \left( \frac{\partial L_b}{\partial \nu} \right)^2 \sigma_\nu^2 + \left( \frac{\partial L_b}{\partial \theta_s} \right)^2 \sigma_{\theta_s}^2 + \left( \frac{\partial L_b}{\partial \theta_v} \right)^2 \sigma_{\theta_v}^2 + \left( \frac{\partial L_b}{\partial h_c} \right)^2 \sigma_{h_c}^2, \quad (9)$$

式中等号右边前 4 项的计算与晴空条件类似,等号右边最后一项为

$$\frac{\partial L_b}{\partial h_c} = \int_{\Delta\lambda} \left[ \frac{\rho_{c,\lambda}}{\pi} \cdot E_{\text{sun},\lambda} \cdot (T_{u_{h_c \rightarrow H},\lambda} \cdot \frac{\partial T_{d,\lambda}}{\partial h_c} + T_{d,\lambda} \cdot \frac{\partial T_{u_{h_c \rightarrow H},\lambda}}{\partial h_c}) + \frac{\partial L_{\text{solar\_scat},\lambda}}{\partial h_c} \right] d\lambda. \quad (10)$$

需要指出的是,对于两种场景杂波辐亮度的计算模型中所需的大气透射率、大气上界太阳总辐照度的数据来源于 MODTRAN。

### 3 场景杂波辐射的计算与分析

单一分量的起伏可认为服从高斯分布  $N(\mu, \delta)$ , 根据晴空与完全充满卷云视场的场景中杂波辐射模型, 分别对各分量在卫星探测的合理范围内取值, 即地表反照率 0.15 以及云顶反照率 0.8, 各自差异  $\sigma_{\rho_s}$  和  $\sigma_{\rho_c}$  为

0.1; 太阳高度角  $60^\circ$  与观测天顶角  $30^\circ$ , 各自变化  $\sigma_{\theta_s}$  和  $\sigma_{\theta_o}$  为  $5^\circ$ ; 大气能见度 23 km, 其波动  $\sigma_v$  为 5 km; 目标海拔高度 5 km 和云顶高度 8 km, 各自变化  $\sigma_h$  和  $\sigma_{h_c}$  为 1 km。分别计算“紫外窗口”中单一分量的浮动引入的背景杂波辐亮度, 结果如图 2 所示。

可以看出由地表/云表反射率的变化产生的辐射变化是晴空及充满卷云视场场景中杂波辐射的最主要贡献; 其余分量产生的辐射变化对杂波辐射的贡献相对较小。在 290~400 nm 的“紫外窗口”区, 统计来自背景不同分量的波动产生的平均杂波辐亮度, 结果见表 1。可以更为直观地比较地表/云表反射率变化产生的杂波辐射与其余分量产生的辐射能量的等级差异。总体上, 卷云反射率的变化产生的杂波辐亮度比地表反射率的变化产生的要高; 由反射率的变化产生的杂波辐射均比其余分量高出 1 个数量级; 而由观测天顶角的变化产生的杂波辐射最小, 为了简化计算可以忽略该分量的变化对场景杂波辐射的影响。

表 1 290~400 nm 来自背景不同分量的波动产生的平均杂波辐亮度

Table 1 Average Clutter radiance caused by each component fluctuation of background in 290~400 nm band

Each component	Average clutter radiance / (W/cm <sup>2</sup> /μm/sr)
$\rho_s$ /%	0.00519
$v$ /km	$3.38011 \times 10^{-4}$
$\theta_s$ /( $^\circ$ )	$6.50323 \times 10^{-4}$
$\theta_o$ /( $^\circ$ )	$1.17726 \times 10^{-4}$
$h$ /km	$8.01867 \times 10^{-4}$
$\rho_c$ /%	0.00729
$h_c$ /km	$8.12199 \times 10^{-4}$

累加来自地气背景各分量的浮动产生的杂波辐亮度, 可分别得到晴空和充满卷云视场两种极端场景下的地气背景总的杂波辐亮度, 结果如图 3 所示。可知 290~400 nm 的“紫外窗口”中, 在充满卷云视场的场景下具有更高的杂波辐亮度。通过对两种场景下平均杂波辐亮度的计算可得晴空场景的平均杂波辐亮度为  $0.00366 \text{ W/cm}^2/\mu\text{m/sr}$ , 而完全充满卷云视场的场景的平均杂波辐亮度为  $0.00474 \text{ W/cm}^2/\mu\text{m/sr}$ , 后者比前者的平均辐亮度高 1.3 倍。

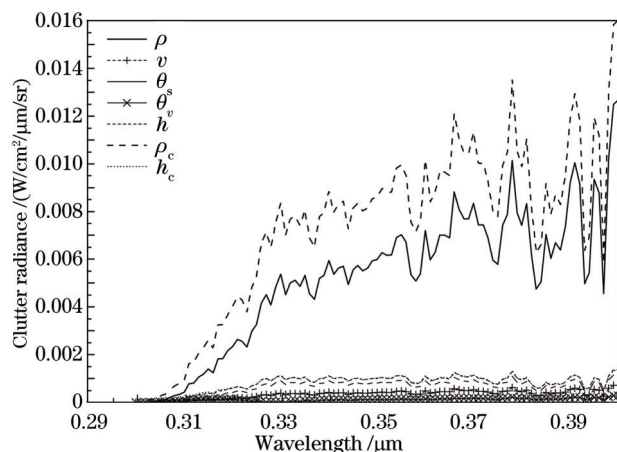


图 2 地气背景各分量浮动引入的杂波辐亮度

Fig.2 Clutter radiance coming from the fluctuation of each earth-atmospheric background component

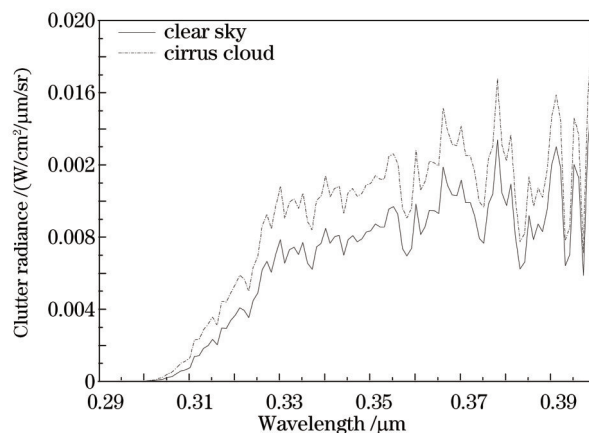


图 3 晴空和卷云两种场景的总的背景杂波辐亮度

Fig.3 Total background clutter radiance in the scenarios of clear sky and cirrus clouds

#### 4 杂波影响下紫外系统的探测性能计算

在探测器入瞳处接收到的目标信号和地气背景的信号是相互独立的。根据入瞳处的目标辐亮度及杂波辐射, 紫外探测系统对应波长的信杂比(SCR)为

$$R_\lambda = \frac{L_{\text{Target},\lambda}}{L_{\text{Clutter},\lambda}}, \quad (11)$$

式中  $R_\lambda$  为波长  $\lambda$  处的信杂比,  $L_{\text{Target},\lambda}$  为探测器入瞳处的来自目标的有效辐射信号,  $L_{\text{Clutter},\lambda}$  为探测器入瞳处的来自背景系统的杂波等效目标信号。

假定在近地表被探测的黑体目标为 3000 K, 其发射能量可由普朗克公式计算。目标自身发射能量与目标-探测器之间对应波长处的大气透射率的乘积为探测器入瞳处的目标辐亮度, 如图 4 所示。可以看出在 290~400 nm 的紫外波段, 随波长的增加该黑体目标能量呈指数形式显著增加。

结合图 3 中给出的对应波长处的两种场景中总的背景杂波辐亮度, 根据(11)式, 可分别计算两种场景下的紫外探测系统信杂比, 计算结果见图 5。可以看出整体上晴空场景系统信杂比要高于充满卷云视场场景的系统信杂比。对于晴空场景, 在 300 nm 处的系统信杂比达到最高, 而充满卷云视场场景在 299 nm 处的系统信杂比最高。根据系统探测通道选取原则(对空间目标探测的通道应选择系统在 SCR 高且与两翼的 SCR 有较大幅度的差异)可以推断出, 在晴空场景下的紫外系统目标探测通道选在 297~306 nm 的光谱范围, 中心波长为 300 nm 处; 充满卷云视场场景的通道则选在 296~303 nm 的光谱范围, 中心波长为 299 nm 处; 后者的光谱响应有效带要比前者窄。

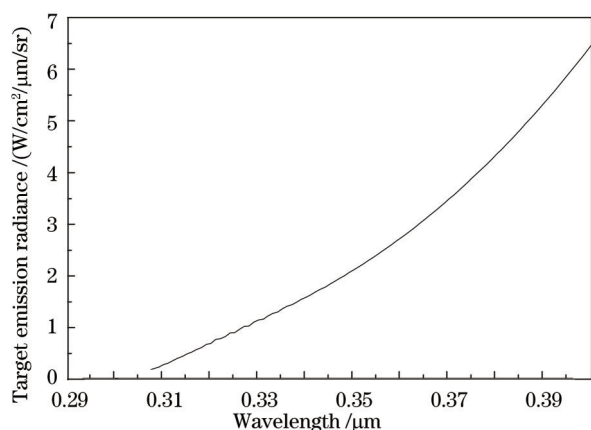


图 4 大气顶的 3000 K 黑体辐射辐亮度  
Fig.4 3000 K blackbody self-emitted radiance on the top of atmospheric

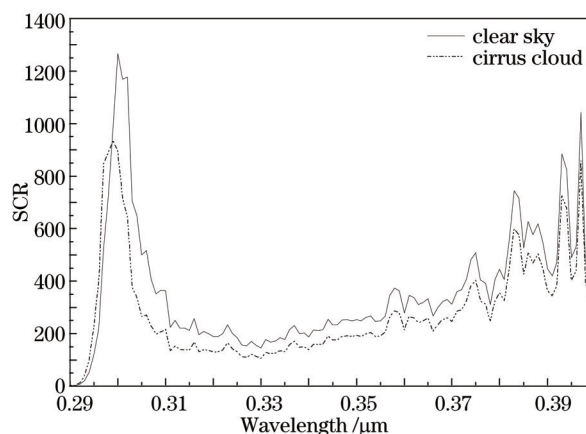


图 5 290~400 nm 波段不同场景紫外探测系统的信杂比  
Fig.5 Ultraviolet detecting system SCR of different scenes in 290~400 nm band

## 5 结 论

紫外波段系统的探测波段的选择与不同场景的杂波辐射特征关系密切。通过建立的晴空及充满卷云视场两种极端场景下的紫外波段的背景杂波模型, 分析得出在紫外窗口波段地气背景杂波辐射主要取决于地表及云表的反射率、大气能见度、太阳高度角、目标海拔高度、云顶高度以及观测天顶角的起伏, 其中地表及云表的反射率的起伏是最主要的影响因素。当给定某一温度下的黑体目标, 通过分析计算的两种场景的杂波水平下探测系统的信杂比, 可以得出在该条件下两种场景系统的有效探测光谱范围及中心波长等通道设计指标。该结论为紫外传感器仪器研制提供有利参考。

## 参 考 文 献

- 1 Zhao Xunjie, Zhang Yingyuan, Gao Zhiyun. Ultraviolet alarm technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(1): 5-9.  
赵勋杰, 张英远, 高稚允. 紫外告警技术[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(1): 5-9.
- 2 Yuanyuan Ma, Xin Lu, Tingting Xi, et al.. Plasma channel formed by ultraviolet laser pulses at 193 nm in air[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(9): 865-868.
- 3 Zhang Hailiang, Jia Honghui, Zhang Xueao, et al.. Research of the ultraviolet radiation transfer in the atmosphere[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(s2): 108-111.  
张海良, 贾红辉, 张学骛, 等. 紫外光大气辐射传输特性研究[J]. 中国激光, 2009, 36(s2): 108-111.
- 4 Wang Baohua, Li Tuotuo, Zheng Guoxian. Research of solar blind ultraviolet detection system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 022202.

- 王保华, 李妥妥, 郑国宪. 日盲紫外探测系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 022202.
- 5 Tang Shaofan, Shen Hongbing. The demonstrate of space-based ultraviolet (UV) missile precaution and the research of UV precaution detector[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2003, 24(4):25-27.
- 唐绍凡, 沈红兵. 天基导弹紫外预警及紫外预警探测仪[J]. 航天返回与遥感, 2003, 24(4): 25-27.
- 6 Hu Shaohua, Leng Feng, Lu Feng. Summarization of ultraviolet warning technology[J]. Shipboard Electronic Countermeasure[J], 2005, 28(1):12-15.
- 胡绍华, 冷 锋, 卢 峰. 紫外告警技术综述[J]. 舰船电子对抗, 2005, 28(1): 12-15.
- 7 Liu Ju, Jia Honghui, Yin Hongwei. Development of military ultraviolet technology[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2006, 4(6): 60-64.
- 刘 菊, 贾红辉, 尹红伟. 军用紫外光学技术的发展[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(6): 60-64.
- 8 Jin Weiqi, He Yuqing, Wang Lingxue, *et al.*. Analysis of atmospheric ultraviolet transmission by computer simulation[J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(1): 48-53.
- 金伟其, 何玉青, 王岭雪, 等. 大气紫外传输特性的计算机仿真分析[J]. 兵工学报, 2001, 22(1): 48-53.
- 9 Li Bo, Wang Shurong, Wang Junbo. Optical design of space-based ultraviolet tracking and detailed reconnaissance system[J]. Chinese J Lasers, 2013,40(9): 0916003.
- 李 博, 王淑荣, 王俊博. 天基紫外跟踪详查光学系统设计[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0916003.
- 10 Kou Yang, Fu Xiuhua, Liu Feng'e, *et al.*. Design and preparation of ultraviolet signal acquisition filter film in optical warning system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1131001.
- 寇 洋, 付秀华, 刘凤娥, 等. 光学告警系统中紫外信号采集滤光膜的研制[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1131001.
- 11 Guan Cong, Gao Jinyu, Qu Yi. Analysis of plume of space-based missile precaution system at ultraviolet band and atmosphere background[J]. Modern Defence Technology, 2010, 38(2): 82-85.
- 贯 丛, 高金宇, 曲 艺. 天基导弹预警紫外波段尾焰信号与大气背景分析[J]. 现代防御技术, 2010, 38(2): 82-85.
- 12 Zhou Feng, Zheng Guoxian, Yan Feng, *et al.*. Development status and thoughts of space-based UV warning technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(6): 39-44.
- 周 峰, 郑国宪, 闫 锋, 等. 天基紫外预警技术发展现状及思考[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(6): 39-44.
- 13 Song Shanshan, Lin Lina, Wang Wensheng. Design of solar blind ultraviolet warning optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 102203.
- 宋珊珊, 林丽娜, 王文生. 日盲紫外告警光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 102203.
- 14 Zhou Wei, Ma Ni, Wu Hanping. Operating rang of ultraviolet detection system in the surface layer and the study of its influence factors[J]. Infrared Technology, 2011, 33(6):357-361.
- 周 伟, 马 妮, 吴晗平. 近地层紫外探测作用距离及其影响因素研究[J]. 红外技术, 2011, 33(6): 357-361.
- 15 Fu Xiuhua, Kou Yang, Liu Dongmei, *et al.*. Research of ultraviolet filter film in solar blind communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0731001.
- 付秀华, 寇 洋, 刘冬梅, 等. 紫外日盲通信系统中滤光膜的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0731001.
- 16 Mao Kebiao, Qin Zhihao. The transmission model of atmospheric radiation and the computation of transmittance of MODTRAN[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2004, 27(4):1-3.
- 毛克彪, 覃志豪. 大气辐射传输模型及MODTRAN中透射率计算[J]. 测绘与空间地理信息, 2004, 27(4):1-3.
- 17 Li Zhanfeng, Wang Shurong, Huang Yu, *et al.*. Research of high-accuracy in-flight spectral calibration of the solar backscattered ultraviolet spectroradiometer[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0228002.
- 李占峰, 王淑荣, 黄 煜, 等. 紫外臭氧垂直探测仪高精度在轨光谱定标方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0228002.
- 18 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. 基于杂波模型的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.

栏目编辑: 史 敏