

天基观测条件下复杂环境 对空中弱小目标可探测性的影响

胡建明¹, 乔凯², 智喜洋^{1*}, 张寅³, 巩晋南¹, 陈文彬¹

(1. 哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094;

3. 南京航空航天大学 航天学院 江苏 南京 210016)

摘要: 针对天基观测复杂环境下空中弱小目标远程广域探测的需求, 立足于天基光学探测链路, 分析太阳光照、云层及地表等复杂背景环境与目标辐射的相互作用机理, 在此基础上提出影响天基目标光学特性的探测场景环境要素; 然后结合目标的可探测性表征, 分析在不同探测谱段情况下, 不同光照、地表背景类型及云层等复杂环境要素对目标可探测性的影响规律; 最后以某典型目标为例, 结合现有的目标特性认知与理论建模, 分析得出复杂环境要素的影响排序, 并根据目标信杂比随谱段的变化特性, 提出探测谱段的优选建议, 为我国隐身/反隐飞行器设计、探测系统设计及信息处理算法优化提供理论依据与科学指导。

关键词: 天基观测; 复杂环境; 空中弱小目标; 可探测性分析; 探测谱段优选

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Influence of complex environment on the detectability of weak and small aerial target under space-based observation mode

HU Jian-Ming¹, QIAO Kai², ZHI Xi-Yang^{1*}, ZHANG Yin³, GONG Jin-Nan¹, CHEN Wen-Bin¹

(1. Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;

3. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming for remote wide-area detection of weak and small aerial target under space-based complex observation conditions, the radiation interaction mechanism of complex background environment, such as solar illumination, clouds and earth surface, and aerial target was analyzed based on the full link of optical detection, and then the main environmental factors that affect the target radiation characteristics were proposed. After that, combined with the detectability characterization, the influence rules of environmental factors, such as different illuminations and various background types, on the target detection performance under different detection spectrum were studied. Finally, by taking a typical target as an example, the influence order of different environmental factors was ranked combined with the existing target characteristics cognition and theoretical modeling, and the detection spectral optimal selection suggestions were given according to the change characteristics of target signal-to-clutter ratio with spectral bands, which provide theoretical basis and scientific guidance for the design of stealth/anti-stealth aircraft, space-based detection system and information processing optimization algorithm.

Key words: space-based observation, complex environment, aerial weak and small targets, detectability analysis, detection spectral optimal selection

PACS: 95.75.Rs, 95.85.Jq, 95.85.Hp

收稿日期: 2018-09-16 修回日期: 2018-10-08

Received date: 2018-09-16 revised date: 2018-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(61605035)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61605035)

作者简介 (Biography): 胡建明 (1994), 男, 江西上饶人, 博士研究生, 主要从事光电信息获取与处理、目标探测与识别等方面研究. E-mail: hjm1007491571@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: zhixiyang@hit.edu.cn

引言

近年来,隐身飞行器目标探测是当前一个重要的研究热点.隐身飞行器的飞行速度快、机动能力强且雷达散射与红外辐射特征弱^[1],而且受到云层、大气、地表辐射等复杂背景环境干扰,使得雷达探测距离、预警时间被大大降低.基于天基平台的光学被动探测具有高时效、高探测性能与检测识别概率等优势,已成为远距离弱小目标远程广域探测的发展趋势^[2-3].

天基观测平台对空中目标进行光学探测是通过搭载在卫星平台上的光学探测载荷对场景进行成像,并结合信息处理算法来实现场景中目标的快速检测识别^[4-6].而在光学探测场景中包含目标与环境背景两部分,二者间相互耦合、相互影响.环境辐射会照射在目标表面,影响目标的有效特征,目标飞行器产生的高温尾焰也会影响周围环境的辐射特征.而针对不同作战场景,环境背景类型繁杂,不仅包含太阳光照、大气路径,还包含各类云及陆地、海洋等地表环境因素的影响,目标与不同环境因素辐射特性、相对空间位置关系等相互作用都会影响目标的可探测性.从现有文献看,目前,针对弱目标探测相关的研究多集中在弱目标本征特性及其与背景的耦合特性^[7-9],以及面向探测应用的目标有效特征增强与提取方面^[10],缺少考虑耦合复杂环境的目标可探测性研究,这导致探测谱段的选择和探测系统关键指标的提出以及基于谱指纹的信息处理算法研究缺乏充分的科学依据.因此,有必要开展影响空中目标可探测性的环境要素及其对典型目标可探测性的影响规律研究.

以空中弱小目标光学探测为目的,开展天基观测条件下复杂背景环境与目标辐射的作用机理研究,剖析影响弱小目标可探测性的环境要素,并研究各要素对目标可探测性的影响规律,通过寻找适用于目标探测的谱指纹,为天基探测谱段优选及探测系统设计和信息处理算法研究提供理论依据和科学指导.

1 天基复杂背景环境与目标的作用机理

1.1 天基探测场景环境要素及其与目标的作用机理

利用天基平台对空中目标进行光学探测通常采用扫描与凝视组合的工作模式.利用线阵扫描相机

快速发现目标,实现远距离广域探测.通过控制指令,引导面阵凝视相机指向目标所在区域,实现目标的持续跟踪与识别.该模式兼顾大视场扫描相机的广域探测快速捕获能力与高分辨率凝视相机的精确跟踪定位与识别能力.天基探测系统原理与组成如图1所示.

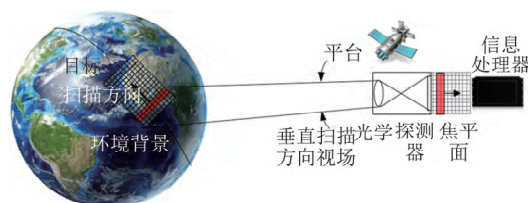


图1 天基探测系统工作原理

Fig. 1 Space-based detection system working principle

天基观测条件下空中目标与背景场景的辐射耦合示意图如图2所示.从图中可见,天基平台上探测器接收到的辐射是太阳辐射与大气、地物复杂作用的结果,探测视场中不仅包含目标本体的辐射能量,同时包含不同太阳光照条件下目标周围大气、云层与陆地、海洋地物等复杂环境的辐射.以图2中飞行高度高于云层高度的飞机为例,其物理效应示意如图3所示.探测焦面上目标的辐射特征需结合目标本体以及太阳、目标周围复杂背景等多种辐射源进行综合考虑,具体如下:(a)太阳投射到飞机表面再反射进入探测视场的部分;(b)太阳辐射投射到云层后反射到飞机表面再进入视场的部分;(c)太阳辐射投射到地面后反射到飞机表面再进入探测视场的部分;(d)云层的直接辐射投射到飞机表面再反射进入探测视场的部分;(e)地面的直接辐射投射到飞机表面再反射进入探测视场的部分;(f)大气环境直接辐射投射到飞机表面再反射进入视场的部分;(g)大气环境散射直接进入探测视场的部分.

1.2 复杂环境背景与目标辐射的耦合特性计算方法

目标与其周边环境背景辐射的多次反射、散射等多物理场耦合效应及相对空间位置关系直接影响目标与背景的辐射差异,从而影响目标的可探测性.

综合考虑目标自身的本征辐射特性、目标对太阳、大气、云层和地表辐射的多次吸收、散射和反射、大气对太阳辐射的散射以及目标与环境元素的空间分布,结合典型目标材料、结构、燃料组分、飞行参数等先验认知和辐射计算理论模型,采用集成目标蒙皮壁面有效红外辐射模型、壁面反射模型、尾焰辐射

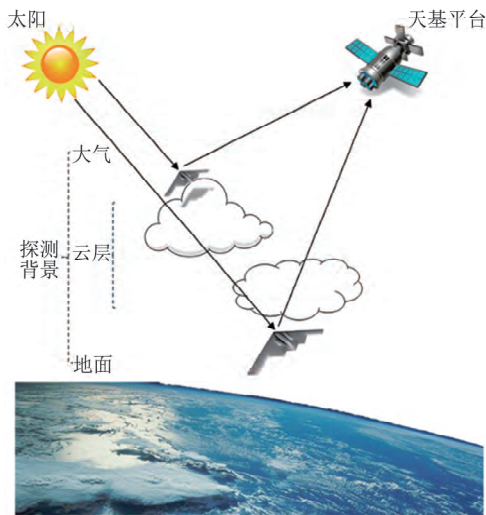


图2 天基观测下空中目标探测场景示意图
Fig.2 Schematic diagram of aerial target detection under space-based observation

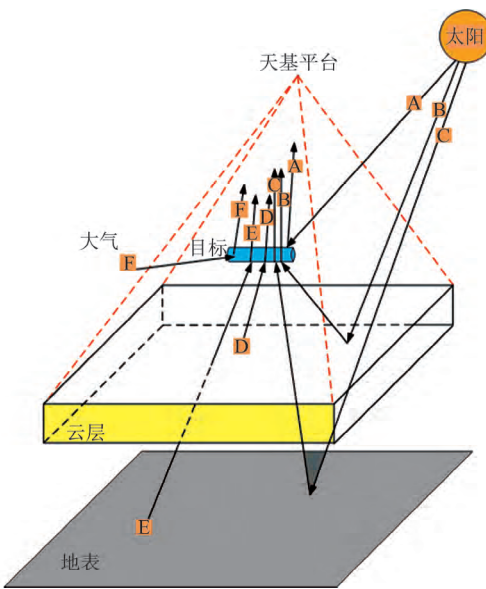


图3 目标与背景耦合特性分解
Fig.3 Target and background coupling characteristic decomposition

窄带模型、云层散射相函数,进行复杂环境下目标辐射特性计算。

目标蒙皮壁面的红外辐射可分为目标自身辐射和反射的环境辐射两部分^[11]。蒙皮壁面的红外辐射强度计算公式为:

$$I_{skin} = I_{self} + I_{reflect}$$

$$= \int_A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{b\lambda} d\lambda dA + \int_A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_r \cdot H_{\lambda, sun} |n \cdot s_i| d\lambda dA$$

$$+ \int_A \int_{2\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_r (L_{\lambda, atmosphere} + L_{\lambda, ground}$$

$$+ L_{\lambda, cloud}) |n \cdot s_i| d\lambda d\Omega dA \quad (1)$$

式中 I_{self} 表示目标的自身辐射强度, $I_{reflect}$ 表示目标反射的环境背景辐射强度, $L_{b\lambda}$ 为黑体辐射亮度, f_r 为壁面反射系数, $H_{\lambda, sun}$ 表示太阳对目标的直接辐射照度, n 表示壁面单位面积的单元矢量, s_i 表示环境辐射的入射矢量, $d\Omega$ 表示入射辐射的立体角, $L_{\lambda, atmosphere}$ 、 $L_{\lambda, ground}$ 、 $L_{\lambda, cloud}$ 分别表示大气、地表以及云对目标的辐射亮度。

目标壁面反射模型采用经典 Sandford-Robertson 双向反射函数模型^[12] 计算目标漫反射和镜反射能量强度。综合考虑目标蒙皮壁面有效红外辐射模型、壁面反射模型、尾焰辐射窄带模型,可以得到不同谱段情况下目标的辐射强度。

目标的尾焰辐射窄带计算采用谱线强度按指数尾倒数规律分布的 Malkmus 模型^[13], 某一中心波数 η 为的谱带平均透过率 $\bar{\tau}_\eta$ 的计算公式为:

$$\bar{\tau}_\eta = \exp \left[-2 \frac{\gamma}{d} \left(\sqrt{1 + xpl \bar{\kappa} \frac{d}{\gamma}} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

式中 $\bar{\gamma}$ 表示吸收性气体的谱线半宽, $1/\bar{d}$ 表示谱线密度(谱线平均间距的倒数), $\bar{\kappa}$ 为吸收系数, x 是摩尔分数, p 为气体压力, l 表示光学行程。

窄带模型参数以 HITEMP 谱线参数数据库为基础^[14], 采用 Young 数值平均方法计算:

$$\bar{\kappa}_i = \frac{1}{\Delta w} \sum_{m=1}^M S_i^m \bar{\gamma}_i = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \gamma_i^m \bar{d}_i$$

$$= \frac{\bar{\kappa}_i \bar{\gamma}_i}{\left(\frac{1}{\Delta w} \sum_{m=1}^M \sqrt{S_i^m \gamma_i^m} \right)^2} \quad (3)$$

式中 S_i^m 表示第 i 光谱区内第 m 条谱线强度, γ_i^m 表示第 i 光谱区内第 m 条谱线半宽, M 表示第 i 光谱内谱线总数, Δw 表示波数区间。

地表、大气和云层背景光学特性采用的计算方法如下: 地表特性主要包括温度、光谱反射率和 BRDF 模型, 陆地、海洋等地表背景采用成熟的 BRDF 经验模型^[15], 并在 ASTER 数据库中匹配查找相应的反射率数据; 参照文献 [16] 的大气的气体组分, 并结合 HITRAN 数据库计算大气散射/吸收特性, 太阳照度、大气亮度和大气透过率通过 Modtran 软件生成; 结合气象条件和云类型的几何形态进行仿真建模云层背景, 并根据有云区域的粒子尺度分布、冰水含量分布和粒子类型分布计算云层的吸收/散射特性。云层散射相函数采用 Henyey-Greenstein 相函数模拟云层对太阳辐射的散射^[17], 其计算公式为:

$$\Phi(\Theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g\cos\Theta)^{3/2}}, \quad (4)$$

式中 g 为非对称因子, 负值表示后向散射强, 正值表示前向散射强。

结合天基光学探测链路及探测场景分析, 天基观测复杂环境背景下的目标辐射特性计算公式可表示为:

$$L_\lambda = L_{target} + [E_{s\lambda} \cos\sigma \tau_1(\lambda) \frac{r(\lambda)}{\pi} + \varepsilon(\lambda) L_{T\lambda} + (E_{ds\lambda} + E_{de\lambda}) \frac{r_d(\lambda)}{\pi}] \tau_2(\lambda) + L_{us\lambda} + L_{ue\lambda} \quad (5)$$

式中 L_λ 表示天基探测器接收到的对地探测 λ 谱段的辐射强度; L_{target} 表示综合考虑壁面红外辐射、壁面反射以及尾焰辐射后的目标辐射强度; $E_{s\lambda}$ 表示到达大气层外的太阳光照辐射强度, 受太阳方位角影响; σ 表示太阳天顶角; $\tau_1(\lambda)$ 为太阳到地面的大气透过率; $r(\lambda)$ 表示典型地物在谱段的光谱反射率; $\varepsilon(\lambda)$ 为地物特有的光谱发射率; $L_{T\lambda}$ 为温度为 T 的黑体辐射光谱亮度; F 表示天空形状参数, 数值为 $0 \sim 1$; $E_{ds\lambda}$ 为地表反射大气散射太阳光的辐射照度; $E_{de\lambda}$ 为大气下行热辐射被地表反射的辐射照度; $r_d(\lambda)$ 为地物漫反射率; $\tau_2(\lambda)$ 表示地面到探测器的大气透过率; $L_{us\lambda}$ 为大气散射的太阳光辐射亮度; $L_{ue\lambda}$ 为大气上行热辐射亮度。

2 复杂环境对典型目标可探测性的影响研究

2.1 目标可探测性表征

空中目标的可探测性取决于其在场景杂波中目标与环境背景间的对比度^[18]。因此目标可探测性可通过目标与背景杂波辐射能量的差异, 即目标信杂比进行度量:

$$SCR_{tar} = \frac{\iint \Omega_{tar} T_{tar} d\Omega_{tar}}{C_{sc}} \quad (6)$$

式中 SCR_{tar} 表示目标信杂比, Ω_{tar} 表示目标所占区域, C_{sc} 为探测尺度下的空间杂波度量, T_{tar} 表示目标物理能量, 可通过 1.2 节中公式 (5) 计算获得。本文采用背景局部区域辐射能量的均方差表征探测场景的空间杂波, 并对信杂比进行了归一化处理。

影响目标可探测性的因素包括目标及不同背景杂波的光谱特征、探测谱段、观测角度、太阳高度角度等。结合天基观测复杂环境背景下的目标辐射特性理论计算、现有典型目标原型参数认知以及目标

可探测性表征, 可以分析目标在不同的飞行状态、天基观测条件及探测系统参数(包含探测谱段)、复杂环境背景情况下目标的可探测性。目标信杂比越高, 表明目标越容易被探测。

2.2 光照对目标可探测性的影响

通过对比不同太阳天顶角状态下, 目标在不同探测谱段下探测器焦面能量及目标信杂比的变化规律, 分析光照对目标可探测性的影响, 太阳天顶角范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$, 间隔为 10° 。所选典型目标、背景及观测条件与探测系统参数如表 1 所示。

表 1 典型目标、背景及探测条件

Table 1 Typical targets, backgrounds and detection conditions

典型目标	环境背景	探测系统
飞行高度: 11 km 发射率: 0.9 飞行马赫数: 0.8 Ma	高层云 云顶高 10.8 km 云底高 10.425 km 1976 美国标准大气 地表温度 288 K 地表反射率 0.05	分辨率 30 m 谱段 0.38 ~ 14 μm 谱段分辨率 10 cm^{-1} 观测天顶角 180°

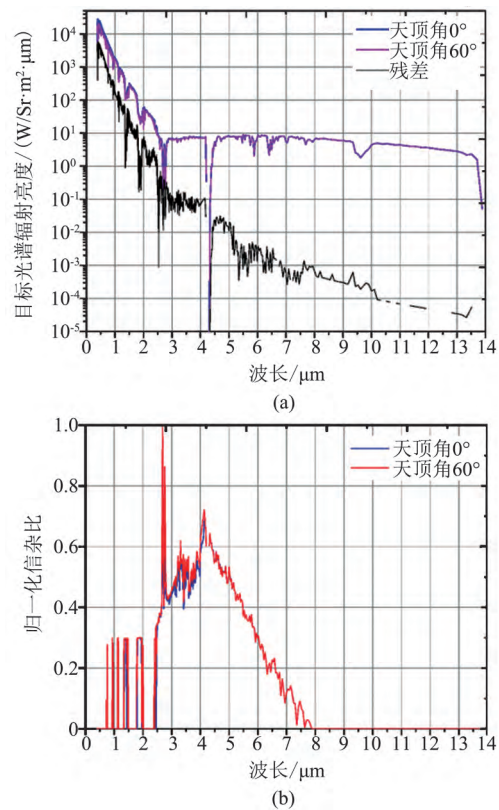


图 4 目标辐射强度与信杂比随探测谱段的变化曲线: (a) 目标辐射强度, (b) 信杂比

Fig. 4 The target radiation intensity and signal-to-stray ratio in different detection bands: (a) radiation intensity, (b) signal-to-stray ratio

图 4 给出了太阳天顶角 0° 和 60° 时, 目标辐射能量和信杂比随不同探测谱段的变化规律曲线. 以空中目标穿行云层的典型探测场景为例, 图 5 所示的是不同谱段、不同光照角度对目标辐射特性的影响结果. 在可见光(图 5(a) 和 (b)) 和近红外谱段范围内, 目标和环境背景的能量主要源自对太阳的反射, 云层背景的后向散射起伏与目标能量十分接近, 同时考虑到目标的反射特性受自身迷彩的影响严重, 在夜间无光照或弱光照情况下, 目标信号几乎消失. 因此, 利用可见光和近红外谱段难以稳定地反映目标的本征辐射特性, 无法实现复杂环境下弱小目标的有效探测. 在短波红外谱段, 由图 5 可见, 光照对目标和背景辐射能量的影响程度有所下降, $1.4 \mu\text{m}$ (图 5(c) 和 (d))、 $1.9 \mu\text{m}$ (图 5(e) 和 (f)) 和 $2.7 \mu\text{m}$ (图 5(g) 和 (h)) 附近水汽吸收带具有一定的谱宽, 可作为潜在的目标探测谱段, 特别是在 $2.7 \mu\text{m}$ 附近的归一化信杂比达到峰值, 存在明显的谱指纹, 适用于目标探测. 在中波和长波红外谱段, 目标和背景的辐射特性受光照的影响很小, 在中波红外 $4.3 \mu\text{m}$ 附近二氧化碳吸收带目标信杂比达到峰值, 适用于目标探测, 长波红外对应的目标信杂比较低且不存在峰值区域, 难以区分目标和背景杂波.

2.3 背景类型对目标可探测性的影响

不同场景区域对应的环境背景不同, 其杂波的

起伏程度有所差异. 背景的类型是影响目标可探测性的重要因素. 考虑到可见光与近红外谱段对太阳光照敏感, 着重分析在 $2 \sim 14 \mu\text{m}$ 红外谱段范围内, 不同背景类型对目标信杂比的影响.

天基观测条件下的环境背景类型包括: 云层、海洋、城镇、机场、港口和桥梁等, 通过计算各类背景图像杂波最强区域的目标信杂比, 分析背景类型对目标可探测性的影响. 图 6 给出了目标分别位于云、海洋、城镇、机场、港口和桥梁六类背景下的目标信杂比变化曲线. 可见, 对于不同类型地表, 城镇、机场、港口和桥梁五类背景对目标可探测性的影响变化趋势较为接近, 其归一化的信杂比相对较大. 云层背景中, 目标的信杂比下降显著. 由此可见, 尽管地表背景类型繁多, 但其对目标可探测性的影响较小, 其中, 海洋背景辐射的影响最小, 港口、桥梁、机场、城镇背景辐射随探测谱段的变化, 影响程度有所起伏, 云层背景杂波是影响目标可探测性的主要环境背景辐射源. 因此, 分析各种复杂云背景对目标可探测性的影响具有必要性.

2.4 云层对目标可探测性影响分析

目标可探测性的影响程度与云类型以及目标和云层的相对空间位置有关. 通过对比目标分别在高层云顶和云底时信杂比的变化规律, 可分析云层的消光效应对目标可探测性的影响. 图 7 给出了目标

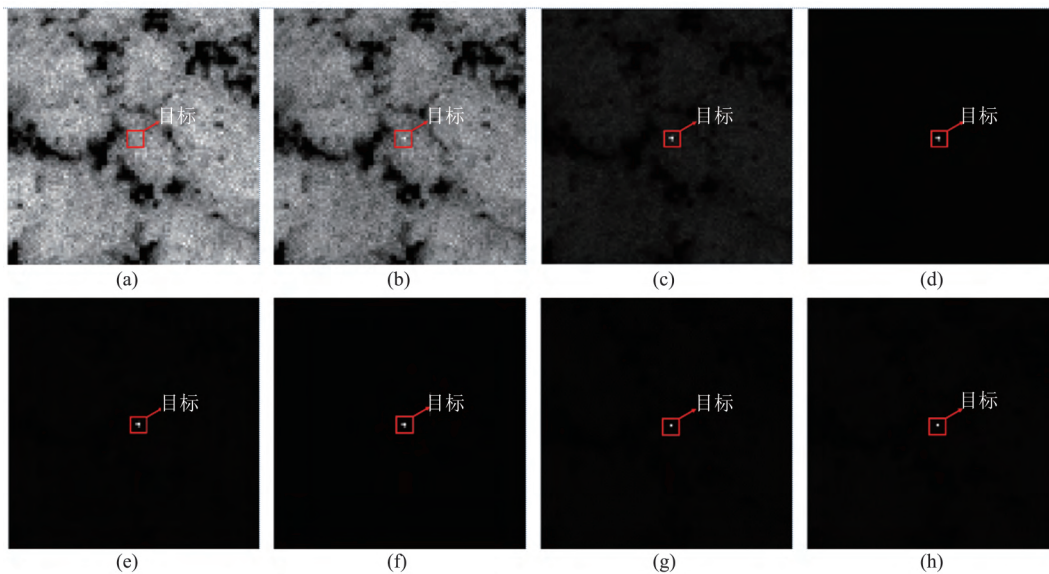


图 5 不同谱段、不同太阳天顶角条件下的图像辐射亮度结果: (a) $0.76 \mu\text{m}$, 0° , (b) $0.76 \mu\text{m}$, 60° , (c) $1.40 \mu\text{m}$, 0° , (d) $1.40 \mu\text{m}$, 60° , (e) $1.90 \mu\text{m}$, 0° , (f) $1.90 \mu\text{m}$, 60° , (g) $2.70 \mu\text{m}$, 0° , (h) $2.70 \mu\text{m}$, 60°

Fig. 5 Results of image radiance with different bands and different solar zenith angles: (a) $0.76 \mu\text{m}$, 0° , (b) $0.76 \mu\text{m}$, 60° , (c) $1.40 \mu\text{m}$, 0° , (d) $1.40 \mu\text{m}$, 60° , (e) $1.90 \mu\text{m}$, 0° , (f) $1.90 \mu\text{m}$, 60° , (g) $2.70 \mu\text{m}$, 0° , (h) $2.70 \mu\text{m}$, 60°

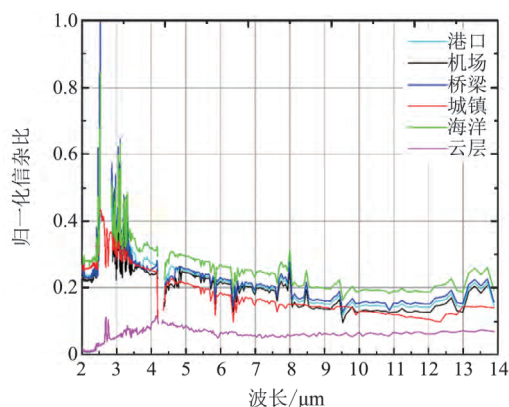


图6 不同背景类型情况下目标信杂比随探测谱段的变化曲线

Fig. 6 The target signal-to-stray ratio with different detection bands under various background types

分别位于高层云顶和云底时的信杂比变化曲线,从图中可见:在可见光、近红外以及长波红外谱段,目标的信杂比整体上较低,目标与背景杂波难以区分;在中波红外谱段附近,云层的消光效应对目标信杂比的影响较为明显,尤其是在 $2.7\ \mu\text{m}$ 、 $3.3\ \mu\text{m}$ 和 $4.3\ \mu\text{m}$ 附近谱段,目标位于云顶情况下其信杂比达到峰值而位于云底时信杂比则相对较低,进一步结合这三个特征谱段的目标/背景的辐射强度对比结果(如图8(e)~(j)所示)发现,目标位于云底时目标辐射亮度明显减弱,仍具备一定的可探测性,因此 $2.7\ \mu\text{m}$ 、 $3.3\ \mu\text{m}$ 和 $4.3\ \mu\text{m}$ 附近谱段可作为备选探测中心谱段。此外,结合图8(a)~(d)中特征谱

段的目标/背景的辐射强度对比结果可知:在 $1.4\ \mu\text{m}$ 、 $1.9\ \mu\text{m}$ 附近短波水汽吸收谱段,无论目标在云顶还是云底,均具有一定的可探测性。

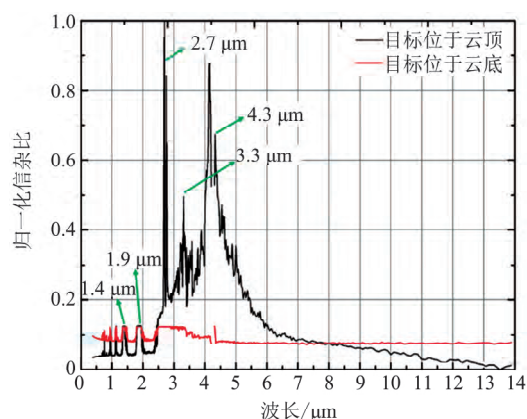


图7 目标位于云顶和云底情况下的信杂比随探测谱段的变化曲线

Fig. 7 The signal-to-stray ratio of the target above and below the clouds in different detection bands

3 结论

面向利用天基平台对复杂环境下空中弱小目标光学探测的需求,研究了天基探测场景的复杂环境要素及其与目标辐射的相互作用机理,给出了天基探测复杂环境背景下的目标辐射特性计算方法。利用信杂比来表征目标的探测性,分析得出了在不同探测谱段下,不同太阳光照、云层及其与目标相对空间位置以及港口、海洋等不同复杂地表背景对目

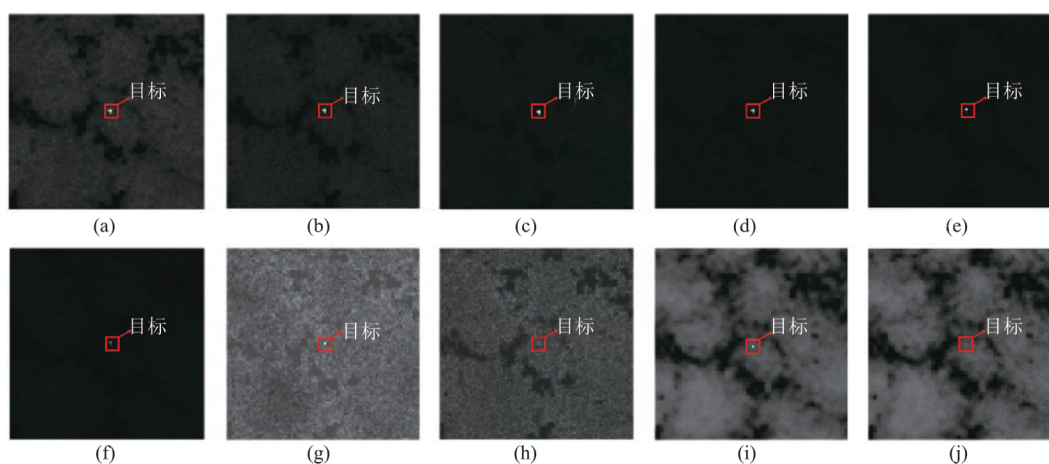


图8 不同谱段下目标位于云底和云顶时的图像辐射亮度结果:(a) $1.40\ \mu\text{m}$, 目标位于云顶,(b) $1.40\ \mu\text{m}$, 目标位于云底,(c) $1.90\ \mu\text{m}$, 目标位于云顶,(d) $1.90\ \mu\text{m}$, 目标位于云底,(e) $2.70\ \mu\text{m}$, 目标位于云顶,(f) $2.70\ \mu\text{m}$, 目标位于云底,(g) $3.30\ \mu\text{m}$, 目标位于云顶,(h) $3.30\ \mu\text{m}$, 目标位于云底,(i) $4.30\ \mu\text{m}$, 目标位于云顶,(j) $4.30\ \mu\text{m}$, 目标位于云底

Fig. 8 Results of image radiance with target above and below the clouds under various bands: (a) $1.40\ \mu\text{m}$, above the cloud, (b) $1.40\ \mu\text{m}$, below the clouds, (c) $1.90\ \mu\text{m}$, above the clouds, (d) $1.90\ \mu\text{m}$, below the clouds, (e) $2.70\ \mu\text{m}$, above the clouds, (f) $2.70\ \mu\text{m}$, below the clouds, (g) $3.30\ \mu\text{m}$, above the clouds, (h) $3.30\ \mu\text{m}$, below the clouds, (i) $4.30\ \mu\text{m}$, above the clouds, (j) $4.30\ \mu\text{m}$, below the clouds

标可探测性的影响关系. 并以某典型空中目标为例, 结合现有的目标特性认知与理论建模, 根据不同探测谱段下的目标信杂比分析结果, 给出了目标的可探测谱段, 可为我国天基探测载荷方案论证优化和信息处理算法研究提供理论与科学依据. 得到的主要结论如下:

(1) 在可见光与近红外谱段, 目标受光照和自身迷彩的影响很大, 不适合作为探测谱段; 在短波红外谱段, 尽管目标仍会受到光照影响, 但从不同谱段下的目标信杂比分析结果看, 在 $1.4 \mu\text{m}$ 和 $1.9 \mu\text{m}$ 附近两个水汽吸收谱段有一定的谱宽, 具有作为探测谱段的潜力. 在中波红外和长波红外谱段, 目标受太阳光照的影响很小.

(2) 在天基探测场景中的复杂环境背景中, 云层是影响空中弱小目标探测的主要背景辐射源, 港口、海洋等典型地表背景对目标可探测性的影响相对较小, 其中海洋背景的影响最小, 港口、机场、城镇等地表背景辐射随谱段变化的影响程度有所起伏.

(3) 云层的消光效应对目标的可探测性能影响严重, 长波红外时目标与云背景杂波难以区分. 且可探测性的影响程度与目标和云层的相对空间位置有关, 当目标被云层遮挡时, 在 $1.4 \mu\text{m}$ 、 $1.9 \mu\text{m}$ 和 $2.7 \mu\text{m}$ 附近等短波水汽吸收谱段、 $3.3 \mu\text{m}$ 和 $4.3 \mu\text{m}$ 附近中波二氧化碳吸收谱段仍具备可探测性.

(4) 综合考虑不同谱段下, 太阳光照的影响以及不同环境背景对目标可探测性的影响, 对于典型空中弱小目标 $2.7 \mu\text{m}$ 、 $3.3 \mu\text{m}$ 和 $4.3 \mu\text{m}$ 附近可作为备选探测中心谱段, $1.4 \mu\text{m}$ 、 $1.9 \mu\text{m}$ 附近具有作为探测谱段的潜力.

References

- [1] Zikidis K, Skondras A, Tokas C. Low observable principles, stealth aircraft and anti-stealth technologies [J]. *Journal of Computations & Modelling*, 2014, **4**(1): 129-165.
- [2] Song Bo. Development of U. S. space-based space situational awareness system [J]. *Space International* (宋博. 美国天基空间态势感知系统发展, 国际太空), 2015 (12): 13-20.
- [3] Wang S T, Zhang W, Wang Q. Measurement for detectivity of infrared detectors in low temperature background [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(3): 484-491.
- [4] Wang C, Qin S. Adaptive detection method of infrared small target based on target-background separation via robust principal component analysis [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, **69**: 123-135.
- [5] Kim S. Analysis of small infrared target features and learning-based false detection removal for infrared search and track [J]. *Pattern Analysis and Applications*, 2014, **17**(4): 883-900.
- [6] Dombert P L, Kuhns A, Mengotti P, et al. Functional mechanisms of probabilistic inference in feature-and space-based attentional systems [J]. *Neuroimage*, 2016, **142**: 553-564.
- [7] Jianwei L, Qiang W. Aircraft-skin infrared radiation characteristics modeling and analysis [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, **22**(5): 493-497.
- [8] Rao A G, Mahulikar S P. Effect of atmospheric transmission and radiance on aircraft infrared signatures [J]. *Journal of aircraft*, 2005, **42**(4): 1046-1054.
- [9] Tian C H, Yang B Y, Cai M, et al. Effect of atmospheric background on infrared target detection [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2014, **43**(2): 438-441.
- [10] ZHU Han-Lu, LU Fu-Xing, RAO Peng. Analysis of Target Detection Spectrum Based on System Contrast [J], *Infrared Technology* (朱含露, 陆福星, 饶鹏. 基于系统对比度的目标探测谱段分析. 红外技术), 2018, **1**: 013.
- [11] HUANG Wei, JI Hong-Hu, LU Hao-Hao. Impact of atmospheric and ground infrared radiation on infrared stealth effect of long-wave band low emissivity of high-flying aircraft [J], *Journal of Aerospace Power* (黄伟, 吉洪湖, 卢浩浩. 大气及地面红外辐射对高空飞机长波低发射率红外隐身效果的影响. 航空动力学报), 2016, (2): 350-359.
- [12] Yoon K B, Park S J, Kim T K. Study on inverse estimation of radiative reflection properties in mid-wavelength infrared region by using the repulsive particle swarm optimization algorithm [J]. *Applied optics*, 2013, **52**(22): 5533-5538.
- [13] Li N, Lv Z, Huai W, et al. A simulation method of aircraft plumes for real-time imaging [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **77**: 153-161.
- [14] Rothman L S, Gordon I E, Barber R J, et al. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, **111**(15): 2139-2150.
- [15] Schaaf C B, Gao F, Strahler A H, et al. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS [J]. *Remote sensing of Environment*, 2002, **83**(1-2): 135-148.
- [16] Fuzzi S, Andreae M O, Huebert B J, et al. Critical assessment of the current state of scientific knowledge, terminology, and research needs concerning the role of organic aerosols in the atmosphere, climate, and global change [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(7): 2017-2038.
- [17] Berk A, Bernstein L S, Anderson G P, et al. MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS [J]. *Remote sensing of Environment*, 1998, **65**(3): 367-375.
- [18] LIU Zun-Yang, SHAO Li, WANG Ya-Fu, et al. A band selection method for infrared warning satellites based on radiation flux apparent contrast spectrum [J], *J. Infrared Millim. Waves* (刘尊洋, 邵立, 汪亚夫, 等. 基于辐射通量表现观对比度光谱的红外预警卫星探测谱段选择方法. 红外与毫米波学报), 2014, **33**(5): 492-497.