

文章编号: 1001-3806(2018)05-0627-06

不同背景下高超声速飞行器红外可探测性分析

于晓杰¹, 郑永超^{1*}, 郭崇岭¹, 董士奎², 杨 霄²

(1. 北京空间机电研究所 先进光学遥感技术北京市重点实验室, 北京 100094; 2. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为了选择设计红外预警卫星的最优探测谱段范围, 采用一种基于目标与背景对比度确定探测谱段的方法, 在综合考虑目标、背景及探测方向等因素、结合探测器参量的前提下, 分别对类 HTV-2 飞行器在不同工况、不同观测角度和不同波长范围内的辐射强度、多种地球/大气背景辐射及不同情况下的目标背景对比度进行了理论分析和仿真。结果表明, 针对类 HTV-2 飞行器, 正俯视观测时, 在 30km 高度、马赫数 $Ma = 7$ 和 50km 高度、马赫数 $Ma = 17$ 两种工况下, 任一背景下, 目标与背景对比度在 $2.65\mu\text{m} \sim 2.85\mu\text{m}$ 谱段处都较大。该结果对探测这一类目标时的谱段选取具有重要参考价值。

关键词: 物理光学; 目标与背景对比度; 仿真研究; 探测谱段; 红外辐射

中图分类号: TN215

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.05.009

Analysis of infrared detectability hypersonic vehicles under different background

YU Xiaojie¹, ZHENG Yongchao¹, GUO Chongling¹, DONG Shikui², YANG Xiao²

(1. Key Laboratory for Advanced Optical Remote Sensing Technology of Beijing, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China; 2. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to select optimal detection spectrum for infrared warning satellites, a method of determining the detection spectrum based on the contrast between the target and background was adopted. In comprehensive consideration of the target, background, direction of detection and detector parameters, radiation intensity under different conditions, different observation angles and different wavelength ranges, various earth/atmospheric background radiation, the contrast between the HTV-2 aircraft target and background were analyzed theoretically and simulated under different conditions. The results show that, for HTV-2 like vehicles, at the observation of waist-level viewing, under the two conditions of 30km height, $Ma = 7$ and 50km height, $Ma = 17$, the contrast between the target and background is larger in the range of $2.65\mu\text{m}$ to $2.85\mu\text{m}$. The results are of great reference value for the selection of spectrum in the detection of this kind of targets.

Key words: physical optics; contrast of target and background; simulation research; detection band; infrared radiation

引 言

临近空间高超声速飞行器一般飞行在 20km ~ 100km 范围内, 飞行速度大于马赫数 $Ma = 5$, 能够实现高速飞行、远程打击、快速突防等作战目标, 具有重要的军事价值, 其中以第 2 代猎鹰高超声速飞行器(falcon hypersonic technology vehicle 2, HTV-2)为代表^[1]。该类目标飞行速度非常快, 雷达散射截面非常小, 使得利用雷达探测手段探测目标的难度很大。传统可见光

探测高超飞行器、隐身飞机需要较高分辨率, 不能用于夜间探测, 且覆盖范围小, 不适用于高超目标的侦察探测^[2-3]。随着高超技术的发展, 现有的雷达、可见光等探测手段难以有效探测该类空天目标, 亟待研究发展有效探测高超目标的新技术及手段。研究发现, 高超飞行器以高超声速在大气层内飞行时, 由于周围空气强烈的压缩和摩擦作用, 会在本体周围形成高温绕流场, 此时高温绕流场内的多组分空气流会产生极强的热辐射^[4-6]。这种热辐射现象为利用红外探测系统对高超飞行器的探测提供了可能途径。红外探测系统^[7-9]对目标进行探测时是通过识别目标和背景的红外辐射信号来实现的, 其中目标与背景对比度是一个重要的研究方向。

国内外针对巡航导弹、弹道导弹等目标的红外可

作者简介: 于晓杰(1992-), 男, 硕士研究生, 现主要从事空间传感器总体设计的研究。

* 通讯联系人。E-mail: laser0371@163.com

收稿日期: 2017-12-11; 收到修改稿日期: 2018-01-03

探测性进行了大量的理论研究和仿真实验验证,但在高超目标红外可探测性方面的探讨比较少。WANG 等人^[10]分析了高超飞行器的红外辐射特征,讨论了实现该类目标红外探测预警的思路和数学模型。ZHOU 等人^[11]分析研究了地基红外探测器对乘波体类高超飞行器的探测性能,建立了一种新的红外系统作用距离计算模型。YANG 等人^[12]分析并建立了飞艇的红外探测系统对“乘波者”类高超飞行器的探测距离模型。YANG 等人^[13]系统分析了地基平台、浮空器、天基卫星对高超声速滑翔飞行器的红外探测能力,得出不同探测波段及不同探测平台对目标的最大作用距离。上述研究是针对单一背景进行分析,没有考虑复杂背景情况下背景辐射对高超目标红外可探测性的影响。

本文中以类 HTV-2 飞行器为研究对象,对飞行弹道上典型飞行条件下的红外辐射特性进行了分析和计算。通过计算卫星正俯视探测时不同飞行工况、不同背景条件下的高超目标与地球/大气背景在 $1\mu\text{m} \sim 14\mu\text{m}$ 波段内的对比度变化规律,给出了针对类 HTV-2 目标滑翔段的最佳探测谱段范围。

1 地球/大气背景和类 HTV-2 目标的红外辐射特性计算

1.1 地球/大气背景特性的计算

类 HTV-2 高超目标滑翔段探测背景主要是地面和大气系统,背景的复杂多样性直接影响系统探测性能。地球/大气背景辐射包括由地球大气系统自身发射的辐射和由该系统反射和散射太阳的辐射。由于计算地球/大气背景辐射所要求的光谱分辨率不高,并且需要考虑太阳的散射以及云的影响,因此,可选择 MODTRN 软件中的相关模型对不同地球/大气背景背景的红外辐射特性进行计算。计算初始条件如下:美国 1976 年标准大气,地表为海洋/森林,气溶胶模式为海洋/乡村,太阳天顶角、方位角都设置为 0° ,云背景为晴天无积云/有积云,考虑大气多次散射。

下面用 MODTRN 软件计算了高超目标所在位置到探测器处不同波长 λ 的大气透过率,如图 1 所示。目标在两个典型高度 30km, 50km 处多种条件下的背景亮度 L_b 如图 2 所示。

从图 2 中可以看出,差异较明显的谱段为 $1.10\mu\text{m} \sim 2.40\mu\text{m}$,该波段是短波红外窗口。两端受大气中水汽与二氧化碳吸收作用限制,且水汽在 $1.80\mu\text{m}$ 处有一个吸收带,所以本窗口可分为 $1.50\mu\text{m} \sim 1.75\mu\text{m}$ 和

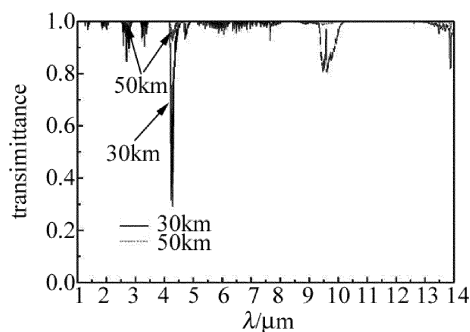


Fig. 1 Relationship between atmospheric transmittance and wavelength at various altitudes

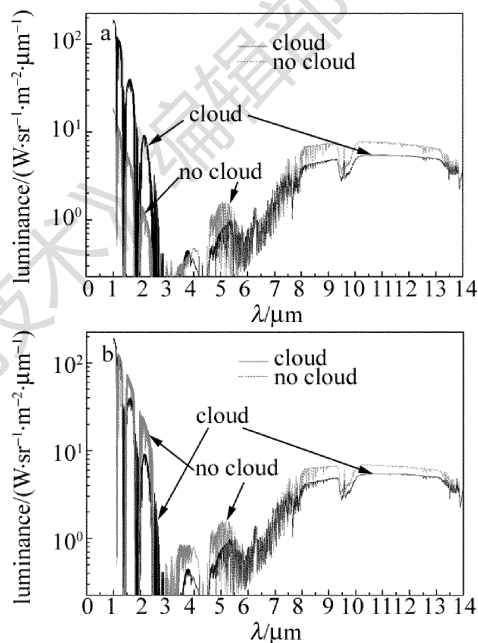


Fig. 2 Infrared radiation of geo-atmospheric backgrounds
a—with and without cumulus in the ocean situation b—with and without cumulus in the forest situation

$2.10\mu\text{m} \sim 2.40\mu\text{m}$ 两个小窗口。在地球辐射中, $0.30\mu\text{m} \sim 3.00\mu\text{m}$ 波段范围内主要反射太阳辐射,而地球本身及表面物体辐射极弱,可忽略不计。

$2.40\mu\text{m} \sim 5.00\mu\text{m}$ 波段是中红外窗口。由于二氧化碳在 $4.30\mu\text{m}$ 处吸收作用很强,所以又可分为 $3.40\mu\text{m} \sim 4.20\mu\text{m}$ 和 $4.60\mu\text{m} \sim 5.00\mu\text{m}$ 两个窗口。有积云时,海洋和森林地表下的背景辐射亮度基本一致。这主要是因为地球/大气背景红外辐射主要是云层反射太阳辐射,故海洋、森林两种背景下的红外辐射相对差异较小;无积云时, $3.00\mu\text{m} \sim 4.20\mu\text{m}$ 范围内,森林地表相对于海洋而言,背景辐射亮度高。主要是由于对于海洋而言,在该谱段内其反射率极低,吸收率较高,而在 $0.70\mu\text{m}$ 以上的红外区,植被有较高反射率,所以无积云时,森林相比于海洋,红外辐射更强。

$8.00\mu\text{m} \sim 14.00\mu\text{m}$ 是热红外窗口,是热红外谱

段,主要是地物本身的热辐射。在这个窗口主要是用来获得地面目标的热辐射信息,能有效地探测地面常温物体。这一波段范围内主要是由于地球本身的热辐射明显大于表面物体的辐射,所以在 $6.00\mu\text{m} \sim 14.00\mu\text{m}$ 处不同背景下的辐射亮度曲线是基本一致的。另外由于二氧化碳在 $9.40\mu\text{m}$ 处有弱吸收带,故在 $9.40\mu\text{m}$ 附近处会有波谷存在,与仿真图中吻合。

1.2 类 HTV-2 目标红外辐射特性计算

类 HTV-2 飞行器处于滑翔段时,头部附近来流受到强烈压缩,在头部周围形成激波层,激波层内的来流动能转化为内能,使得温度急剧上升,对飞行器形成气动加热效应。由于与周围环境相比,高超声速飞行器表面温度明显要高,故可只考虑目标自身辐射,且将目标视为灰体,发射率为常数。

计算目标温度场主要采用流热耦合的方式。通过 3 维软件 Pro/e 对目标建模,然后用 ICEM 软件对其进行网格划分。使用商业软件 CFD 对目标蒙皮外表面的气动加热进行计算,求得蒙皮温度场^[13]如图 3 所示。

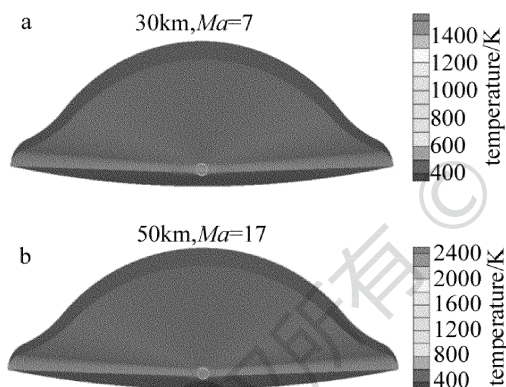


Fig. 3 Surface temperature of HTV-2 type vehicle

从图中可以看出,30km 高度、马赫数 $Ma = 7$ 和 50km 高度、马赫数 $Ma = 17$ 两种工况对应球头部分的最高温度分别为 1500K 和 2400K。该计算结果与相关文献^[14]中报道的 HTV-2 本体表面所能承受的温度极限 2200K 相接近。根据得到的温度场分布,利用普朗克公式对目标本体辐射进行计算。

定义目标观测方向如图 4 所示。以目标为坐标原点,设置目标的球头方向为 x 轴的正半轴方向,水平方向为 y 轴, z 轴的正半轴为竖直向上方向, θ 为观测方向的天顶角, φ 为观测方向的圆周角。

采用普朗克公式^[15]计算目标本体的红外辐射。普朗克定律引入了微观粒子能量不连续假设,确定了黑体辐射强度与其绝对温度和波长之间的关系,其数

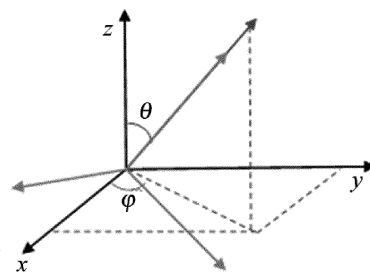


Fig. 4 Diagram of the observed angle

学表达式为:

$$E_{\lambda,b} = \frac{2\pi hc^3}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (1)$$

式中, λ 为波长; $E_{\lambda,b}$ 为黑体辐射光谱力,单位 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$; h 为普朗克常数, $h = 6.624 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$; k 为玻尔兹曼常数, $k = (1.380662 \pm 0.000044) \times 10^{-23} \text{J/K}$; c 为光速, $c = (2.99792458 \pm 0.000000012) \times 10^8 \text{m/s}$; c_1 为第一辐射常数, $c_1 = (3.7415 \pm 0.0003) \times 10^{-16} \text{W} \cdot \text{m}^2$; c_2 为第二辐射常数, $c_2 = (1.43879 \pm 0.00019) \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

目标的光谱辐射强度^[16]定义为在一定方向上,单位投影面积内的光谱辐射总和 ($\text{W}/(\mu\text{m} \cdot \text{sr})$),计算公式为:

$$I_{\lambda} = L_{\lambda} A_t \quad (2)$$

式中, A_t 为目标的可见面积。

设目标的光谱发射率为 ε_{λ} ,用朗伯源模型计算光谱辐射亮度 L_{λ} ($\text{W}/(\mu\text{m} \cdot \text{sr} \cdot \text{m}^2)$),计算公式为:

$$L_{\lambda} = \frac{\varepsilon_{\lambda} E_{\lambda}}{\pi} \quad (3)$$

式中, E_{λ} 为目标光谱辐射出射度。

设目标表面由 N 个表面发射率为 ε_i 的微元面组成,发射率取为 0.9,沿观测方向上每个微元的可见面积为 A_i (m^2),则目标沿观测方向上的光谱辐射强度 I_{λ} ($\text{W}/(\mu\text{m} \cdot \text{sr})$) 由(1)式~(3)式可知:

$$I_{\lambda} = \sum_{i=1}^N \frac{\varepsilon_i E_{\lambda,b} A_i}{\pi} \quad (4)$$

图 5 中分别给出了目标在 30km 高度、马赫数 $Ma = 7$ 和 50km 高度、马赫数 $Ma = 17$ 两个工况, x 轴、 y 轴和 z 轴 3 个特定观测方向下的 $1\mu\text{m} \sim 14\mu\text{m}$ 波段内的光谱辐射强度计算结果。在相同高度下,俯视观测即 z 轴观测方向 ($\theta = 0^\circ, \varphi = 0^\circ$) 时,目标的光谱辐射强度最大,前视即 x 轴观测方向 ($\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ$) 时

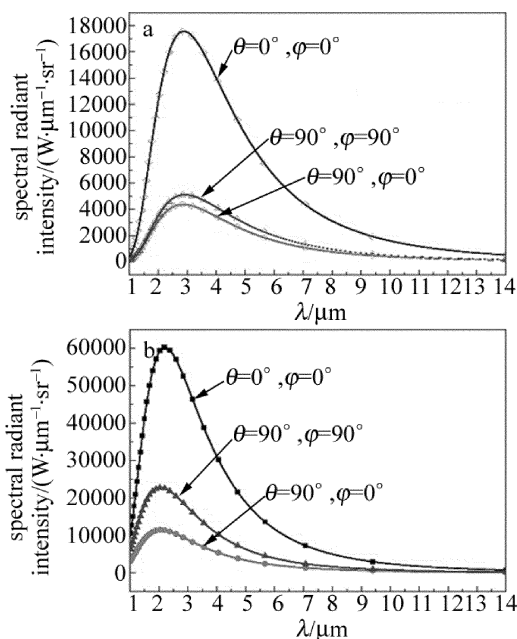


Fig. 5 Spectral radiant intensity with different observed angles
a—30km, $Ma = 7$ b—50km, $Ma = 17$

辐射强度最小。这是因为探测角度的不同,导致飞行器的可见表面积和对应的温度分布也有所不同。俯视观测光谱强度较高,是其可见表面积明显大于另外两个角度的可见表面积。30km 高度、马赫数 $Ma = 7$ 工况下辐射光谱的峰值波长约在 $3.00\mu\text{m}$ 附近,而 50km 工况峰值向左移动约 $1\mu\text{m}$,这是因为壁面光谱辐射峰值与表面温度相关,且温度升高峰值波长变短,这也符合维恩位移定律的描述。观测角度相同时,50km 高度、马赫数 $Ma = 17$ 工况下的光谱辐射强度要高于 30km 高度、马赫数 $Ma = 7$ 工况。

目标在 30km、50km 两个典型飞行高度时,改变观测方向的天顶角($0^\circ \sim 180^\circ$)和圆周角($0^\circ \sim 360^\circ$),计算得出 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 、 $8\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ 波段内的总辐射强度大小如图 6 ~ 图 9 所示。相同条件下, $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 波

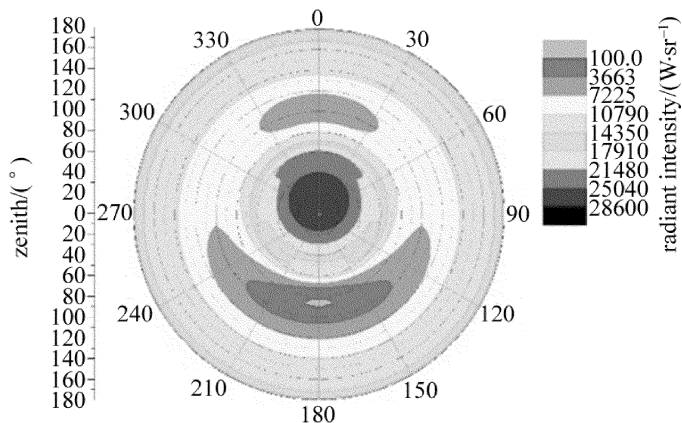


Fig. 6 Total radiation intensity of $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ in 30km, $Ma = 7$

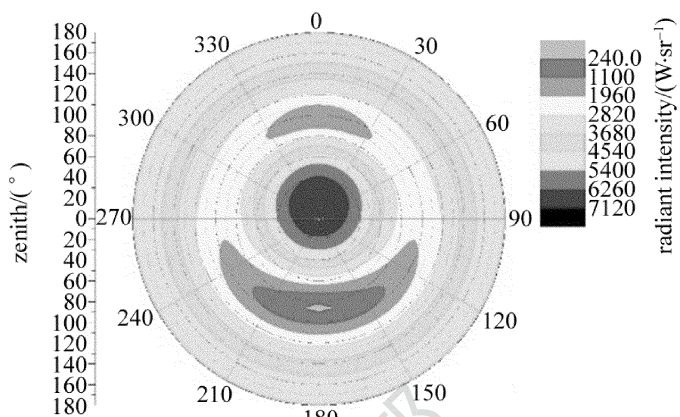


Fig. 7 Total radiation intensity of $8\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ in 30km, $Ma = 7$

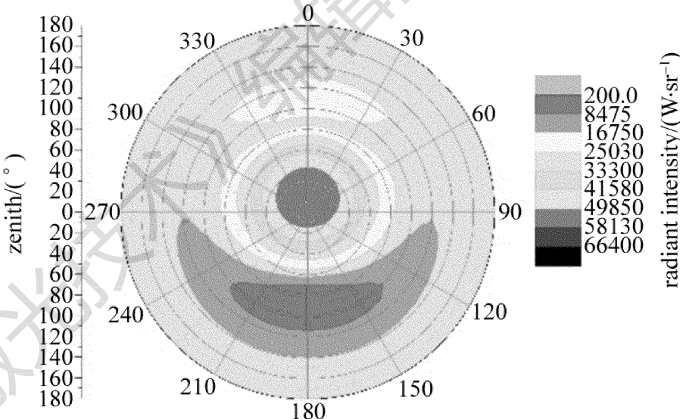


Fig. 8 Total radiation intensity of $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ in 50km, $Ma = 17$

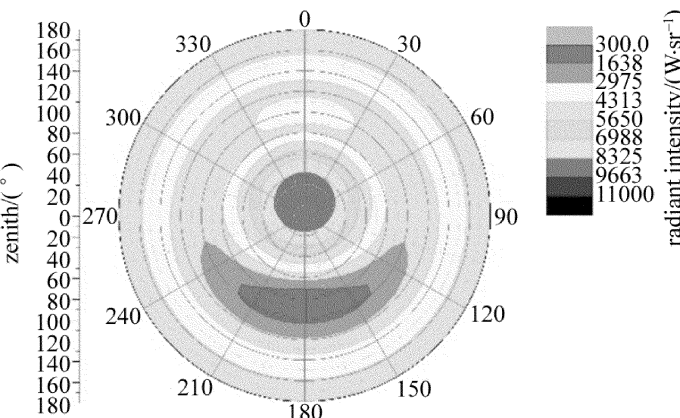


Fig. 9 Total radiation intensity of $8\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ in 50km, $Ma = 17$

段内总的辐射强度比 $8\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ 波段内的大。目标在 50km 高度下各个方向的辐射强度都要高于 30km,这主要是由于 50km 高度、马赫数 $Ma = 17$ 工况下,气动加热效应更强,导致表面温度更高。

2 目标背景对比度计算及分析

目标背景对比度是表征探测系统性能的一个重要指标,其值越大,越容易实现对目标的探测。目标与背景对比度受多种因素影响,其与大气透过率有关,不同

大气背景、不同高度的大气透过率不同,产生的背景辐射也是不同的;与目标及探测器的相对位置也有关系。在点目标探测系统中,目标背景对比度如下^[17-19]:

$$C = \frac{I_t \tau_a - L_b A_t}{L_b A_p} \quad (5)$$

式中, I_t 表示目标红外辐射强度, τ_a 表示大气透过率, L_b 表示背景辐射亮度, A_t 表示目标沿视线方向投影面积, A_p 表示瞬时视场在目标所在位置投影面积。

以低轨道探测器为例,其轨道高度为 1000km,分

辨率为 100m, 目标位于卫星正下方海拔 30km, 50km 高度。利用(5)式计算目标背景对比度光谱变化规律,如图 10 所示。

从图 10 中可以看出,在 $2.50\mu\text{m} \sim 3.00\mu\text{m}$ 波段范围内的目标背景对比度较大,在 $1.80\mu\text{m} \sim 2.00\mu\text{m}$, $3.00\mu\text{m} \sim 3.50\mu\text{m}$ 及 $4.30\mu\text{m} \sim 4.50\mu\text{m}$ 处的目标背景对比度也有一定的峰值,但与 $2.50\mu\text{m} \sim 3.00\mu\text{m}$ 相比量级太小,可以忽略不计。为了更精确的分析,下面计算了 $2.50\mu\text{m} \sim 3.00\mu\text{m}$ 处的目标与背景对比度,如

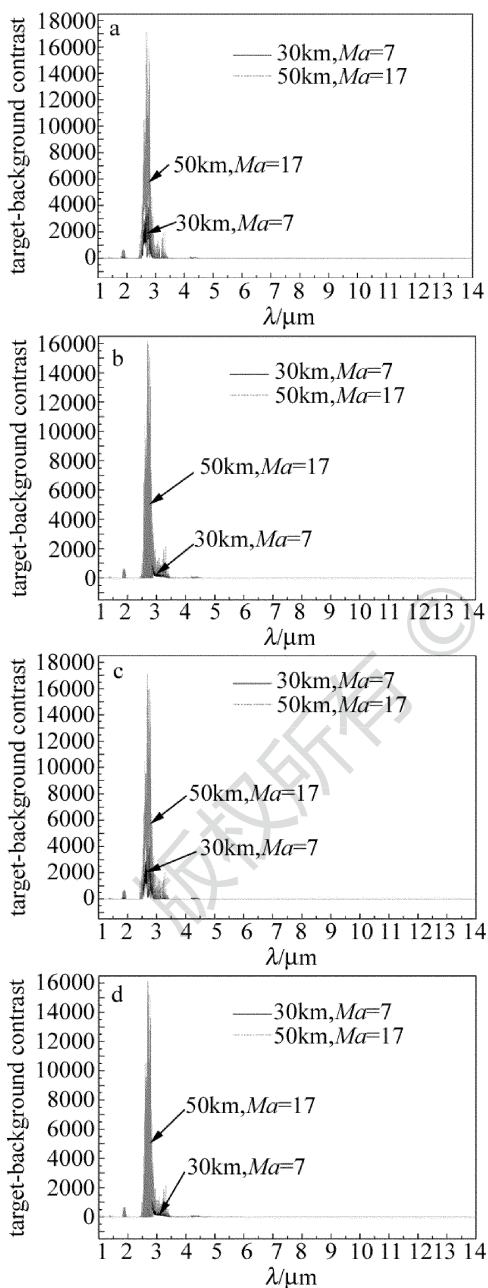


Fig. 10 Target-background contrast

a—without cumulus in the ocean situation b—with cumulus in the ocean situation c—without cumulus in the forest situation d—with cumulus in the forest situation

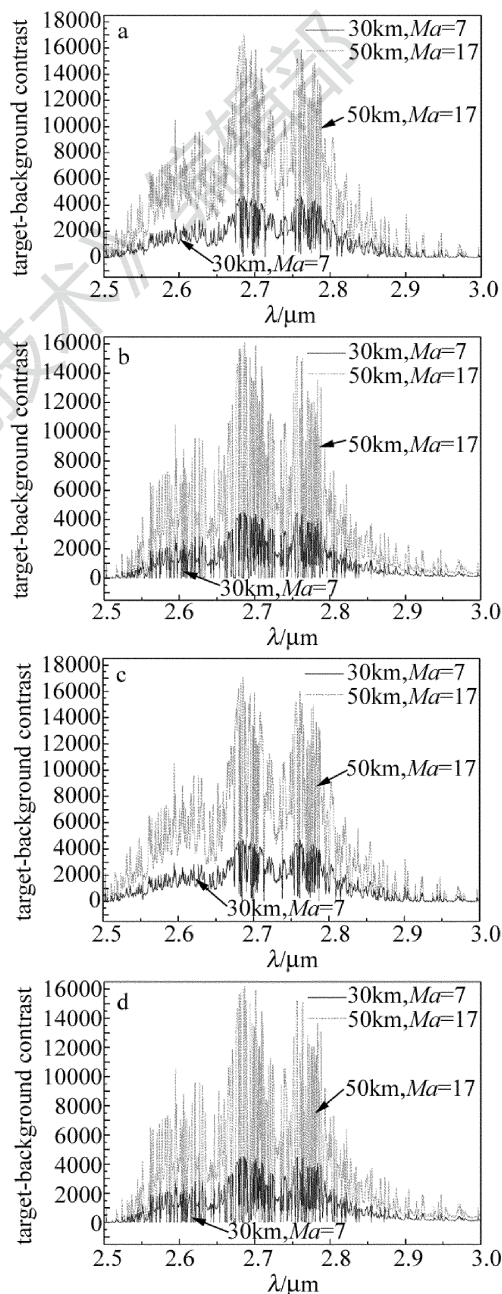


Fig. 11 Target-background contrast in the vicinity of $2.7\mu\text{m}$

a—without cumulus in the ocean situation b—with cumulus in the ocean situation c—without cumulus in the forest situation d—with cumulus in the forest situation

图 11 所示。

从图 10、图 11 的光谱变化中可分析出:(1)类 HTV-2 高超目标在 30km 高度、马赫数 $Ma = 7$ 和 50km 高度、马赫数 $Ma = 17$ 两种工况下, $2.70\mu\text{m}$ 波段附近目标背景对比度先增大后有所下降;50km 高度、马赫数 $Ma = 17$ 工况下的目标背景对比度远大于 30km 高度、马赫数 $Ma = 7$ 工况下的;不同背景下的 30km 高度、马赫数 $Ma = 7$ 工况的目标背景对比度基本一致,这说明目标在这种工况下,背景对目标背景对比度的影响很小;(2)当探测背景无积云时,海洋地表下的目标背景对比度相比于森林地表情况下是基本一致的;有积云时,也符合上述情况,这说明地表类型对目标背景对比度的影响不大;(3)在不同工况和任一背景下,目标背景对比度在 $2.65\mu\text{m} \sim 2.85\mu\text{m}$ 这个谱段范围内都较大,所以不考虑其它影响因素时,可将其作为设计红外探测系统时的参考。

3 结 论

计算了高超目标在两种典型飞行工况下的红外辐射特性、不同背景的辐射强度变化。以此为基础,计算获得了多种情况下的目标背景对比度的变化曲线。通过对仿真结果的分析,得出 $2.65\mu\text{m} \sim 2.85\mu\text{m}$ 这个谱段范围更适合卫星探测。由于本文中只是从目标背景对比度单一角度开展卫星最佳谱段的定量研究,所以在接下来的工作中要综合考虑信噪比、探测系统灵敏度等探测指标的影响,从多角度深入开展研究。

参 考 文 献

- [1] WALKER S, SHERK J, SHELL D, *et al.* The DARPA/AF falcon program: the hypersonic technology vehicle #2 (HTV-2) flight demonstration phase[C]// AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. Washington DC, USA; American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008;2539.
- [2] WANG L D, ZENG Y H, GAO L, *et al.* Technology status and development trend for radar detection of hypersonic target in near space[J]. Journal of Signal Processing, 2013, 30(1): 73-81 (in Chinese).
- [3] GU B Y, LI B, LIU R F. Research progress on target characteristics of hypersonic aircraft in foreign countries[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2014(5): 72-76 (in Chinese).
- [4] BLANCHARD R, ANDERSON B, WELCH S, *et al.* Shuttle orbiter fuselage global temperature measurements from infrared images at hypersonic speeds[C]//AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. Washington DC, USA; American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002;4702.
- [5] BEIER K. Infrared radiation model for aircraft and reentry vehicle[J]. Proceedings of the SPIE, 1988, 972: 363-374.
- [6] MAHULIKAR S P, SONAWANE H R, RAO G A. Infrared signature studies of aerospace vehicles[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2007, 43(7): 218-245.
- [7] WU L M, ZHOU F, WANG H Y. Study on the relationship between the infrared detectors background limit detectivity and the optical systems work temperature[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2010, 31(1): 36-41 (in Chinese).
- [8] WU L M, ZHOU F, WANG H Y. Research of operation range model for detecting moving point target in deep space background[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2010, 31(3): 21-26 (in Chinese).
- [9] WANG R, HAO X J, ZHOU H Ch, *et al.* Design of infrared signal detection circuit in a temperature calibration system[J]. Laser Technology, 2013, 37(2): 247-250 (in Chinese).
- [10] WANG Y F, CHEN J. Infrared radiation signature of hypersonic vehicle and its infrared detection and early warning[J]. Tactical Missile Technology, 2011(2): 55-57 (in Chinese).
- [11] ZHOU J W, LI J Ch, SHI Zh G. *et al.* Research of infrared detectability of hypersonic vehicle[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0504001 (in Chinese).
- [12] YANG H, ZHANG Y Sh, DING W Zh. Detectability of airship infrared detection system to hypersonic vehicle[J]. Chinese Optics, 2016, 9(5): 596-605 (in Chinese).
- [13] YANG X, NIU Q L, HE Zh H, *et al.* Analysis of infrared characteristics and detectability of HTV-2 type vehicle[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1204001 (in Chinese).
- [14] GLASS D, DIRLING R, CROOP H, *et al.* Materials development for hypersonic flight vehicles[C]// 14th AIAA/AHI Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. Washington DC, USA; American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006;8122.
- [15] XU G X. Optical characteristics of object and environment[M]. Beijing: Astronautic Publishing House, 1995; 11-12 (in Chinese).
- [16] TIAN B, XIE F, FAN Ch Y, *et al.* Study of detection capability of low orbit infrared detection satellite to high dynamic target in atmosphere[J]. Infrared (Monthly), 2015, 36(5): 1-15 (in Chinese).
- [17] YE Q, SUN X Q, SHAO L. Analysis of optimum detective wavebands for infrared early-warning satellite[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(3): 389-393 (in Chinese).
- [18] LIU Z Y, SHAO L, WANG Y F. *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 (in Chinese).
- [19] WANG Ch, LI Y, LI J L. *et al.* Research summary of IR characteristic and contrast between object and background[J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(1): 4-6 (in Chinese).