

类 HTV-2 高超声速滑翔飞行器红外辐射特征与可探测性分析

杨霄, 牛青林, 贺志宏, 董士奎

哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 以类 HTV-2 高超声速滑翔飞行器为研究对象, 对其红外辐射特征进行了仿真分析。综合考虑了目标、背景、传输过程的方向和光谱特性, 系统分析了地基平台、浮空器、天基卫星对类 HTV-2 高超声速飞行器的红外探测能力, 得到了不同探测波段、不同探测平台的最大探测距离。研究结果表明, 目标的红外辐射强度受观测方向的影响较大, 最大探测距离随探测器灵敏度的增加而增大, 中波波段(3.7~4.8 μm 、3.0~5.0 μm)的探测距离比长波波段(7.7~9.5 μm 、8.0~12.0 μm)的大。

关键词 探测器; 红外辐射特征; 探测距离; 高超声速滑翔飞行器; 探测波段; 探测平台

中图分类号 TN215 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1204001

Analysis of Infrared Radiation Characteristics and Detectability of HTV-2-like Hypersonic Gliding Aircrafts

Yang Xiao, Niu Qinglin, He Zhihong, Dong Shikui

School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract With the HTV-2-like hypersonic gliding aircrafts as the research objects, their infrared radiation characteristics are simulated. With the overall consideration of the direction and spectral characteristics of the target, the background and the transmission process, the infrared detection capabilities of the ground-based platform, the floating machine and the space-based satellite to the HTV-2-like hypersonic aircrafts are systematically analyzed, and the maximum detection distances for different detection platforms and detection wave bands are obtained. The study results show that the observation direction has a great influence on the infrared radiation intensity of targets, and the maximum detection distance increases with the decrease of the detector sensitivity. The detection distance in the medium-wave bands (3.7-4.8, 3.0-5.0 μm) is longer than that in long-wave bands (7.7-9.5 μm , 8.0-12.0 μm).

Key words detectors; infrared radiation characteristics; detection distance; hypersonic gliding aircraft; detection band; detection platforms

OCIS codes 040.3060; 040.1880

1 引 言

临近空间高超声速飞行器能够实现高速飞行、远程打击、快速突防等作战目标, 具有重要的军事价值, 受到广泛的关注。临近空间高超声速飞行器大多还处于研发阶段, 典型代表型号有 X-51A^[1] 和 HTV-2^[2]。在未来攻防对抗中, 为实现对临近空间高超声速目标的有效预警、跟踪和拦截, 基于红外辐射特性的可探测性研究显得尤为重要。

临近空间高超声速乘波体飞行器在大气层飞行时, 头部和前缘附近空气受到剧烈压缩, 在飞行器周围形

收稿日期: 2017-06-09; **收到修改稿日期:** 2017-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(51576054)

作者简介: 杨霄(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事目标红外辐射特性方面的研究。E-mail: yangxiaohit@163.com

导师简介: 董士奎(1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事目标与背景光辐射特性方面的研究。

E-mail: dongsk@hit.edu.cn(通信联系人)

成激波层,强烈的气动加热效应会使飞行器表面温度升高。与环境背景相比,该类目标在红外辐射特性方面存在明显的特征,探测信噪比较高,使得红外波段探测成为可能。红外探测系统通过识别目标和背景的红外辐射信号进行目标探测,作用距离是表征红外探测系统性能的一个重要指标。红外探测系统的作用距离主要由目标红外辐射特性、大气环境及探测器参数共同决定。关于红外系统的作用距离计算模型^[3-6]及影响因素^[7-12]的研究已有很多,但关于不同探测体制下临近空间高超声速飞行器红外探测系统的研究鲜有报道。

本文以类 HTV-2 滑翔飞行器为对象,对飞行弹道上典型飞行条件下的气动热、表面温度场和红外辐射特性进行了建模仿真,获得了目标方向及光谱辐射特征数据。综合考虑目标、背景及传输过程的方向和光谱特性,结合传感器性能参数,系统分析了地基平台、浮空器和天基卫星对类 HTV-2 高超声速飞行器的红外探测能力,给出了不同探测波段和不同探测平台对目标的最大探测距离。

2 临近空间高超声速目标的红外辐射特性分析

2.1 几何模型与计算条件

类 HTV-2 几何形状如图 1 所示,球头半径 r_1 为 0.34 m,翼展圆弧半径 r_2 为 0.16 m,机身底部半径 r_3 为 5.7 m,总长度为 3.67 m,最大宽度为 2.20 m,尾部高度为 0.88 m。为研究类 HTV-2 目标的红外探测距离,将文献[13]拟合的 HTV-2 飞行轨迹数据整理成曲线,如图 2 所示。从轨迹 A 中选取两个典型高度计算工况,结果见表 1。

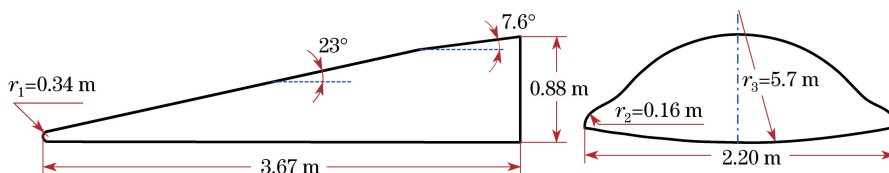


图 1 类 HTV-2 滑翔飞行器的几何结构

Fig. 1 Geometric structure of HTV-2-like gliding aircraft

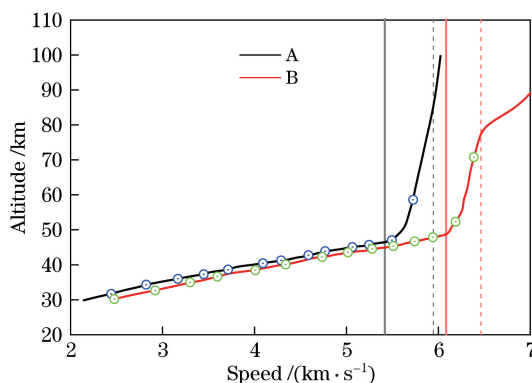


图 2 HTV-2 滑翔飞行器飞行速度及海拔示意图

Fig. 2 Diagrams of flight speed and altitude of HTV-2 gliding aircraft

表 1 工况参数

Table 1 Working parameters

Case	Altitude /km	Speed / (km · s ⁻¹)	Mach number	Pressure /Pa	Temperature /K
1	30	2.16	7.16	1197	226.5
2	50	5.60	17.00	79.78	270.7

2.2 类 HTV-2 飞行器的壁面温度计算

类 HTV-2 飞行器的滑翔空域及飞行速度变化大,外部高速空气绕流可能经历热化学非平衡状态,因此外部绕流流场的计算采用基于纳维-斯托克斯(N-S)方程的双温度模型和有限速率化学反应模型。空气化学

反应模型选取文献[14]中的化学反应动方式。对于 N-S 方程采用文献[15]中的离散格式和数值求解方法。对于热化学非平衡气体辐射,气动加热壁面热流由对流热流(平动项和振动项)和组份扩散热流两部分组成。

对于高超声速飞行器气动热环境数值模拟,必须给定表面温度分布。为方便计算,将飞行器表面简化为均匀厚度的薄壳结构。考虑壁面辐射效应和热传导效应,通过建立壁面能量守恒方程求解壁面温度分布。壁面热流平衡关系如图 3 所示,即气动加热壁面热流($q_{aero-in}$)等于以一定发射率辐射出的热流($q_{rad-out}$)和通过热传导进入蒙皮的热流(q_{cond})。此时,仅考虑蒙皮法向方向的热传导,即一维导热模型。

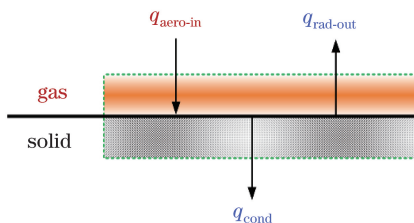


图 3 壁面热流示意图

Fig. 3 Diagram of heat-flux at surface

因此,飞行器表面温度可通过如下步骤获得:首先给定壁面一个初始温度 T_w ,在气体域内求解获得一个气动加热壁面热流密度,然后以该热流密度为条件,依据壁面热流平衡获得壁面温度 T_w ,以此迭代获得满足计算精度要求的壁温。

为验证表面温度计算方法的准确性,选择文献[16]中算例:计算模型为半径 $R_N=1.0$ m 的半球模型,飞行高度 $H=65$ km,飞行速度 $V=8$ km \cdot s $^{-1}$ 。温度场计算网格如图 4 所示,其中 x 、 y 分别表示横、纵轴方向上的长度,采用 110×80 个网格。计算边界状态选取与文献[16]的一致。图 5 给出了半球表面温度分布与文献结果的比较,其中 S 为弧长。由图 5 可见,计算结果与文献结果一致,验证了本文算法的正确性。

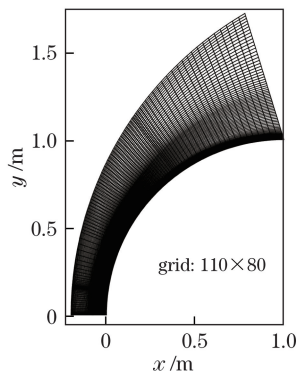


图 4 计算网格

Fig. 4 Computational mesh

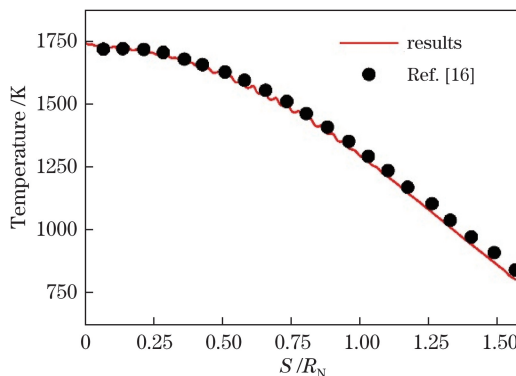


图 5 表面温度对比

Fig. 5 Surface temperature comparison

采用上述算法计算获得了类 HTV-2 飞行高度分别为 30 km 和 50 km 时的表面温度,计算结果如图 6 所示。可以看出,最高温度集中在球头部分,且飞行高度 30 km 和 50 km 两种工况对应的温度分别为 1500 K 和 2400 K。该计算结果接近文献[17]报道的 HTV-2 表面可承受的温度极限 2200 K。

2.3 红外辐射特性分析

目标的红外辐射特性由激波层内气体辐射及本体辐射构成,文献[18]表明,在中远红外波段,激波层气体辐射的贡献远小于本体辐射的,故忽略了激波层气体辐射的贡献。目标的本体辐射主要由表面温度、表面发射率及可见面积共同决定,本文计算中发射率取 0.9。设目标表面由 N 个表面发射率为 ϵ_i ($i=1,2,\dots,N$) 的微元面组成,沿观测方向上每个微元的可见面积为 A_i ,则目标沿观测方向上的光谱辐射强度为

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

式中 $E_{b\lambda}$ 为黑体的光谱辐射力, λ 为辐射波长。

目标观测方向的定义如图 7 所示,以目标为坐标原点,目标球头方向为 X 正半轴方向,水平方向为 Y 轴, Z 正半轴为竖直向上方向, θ 为观测方向天顶角, Φ 为观测方向圆周角。

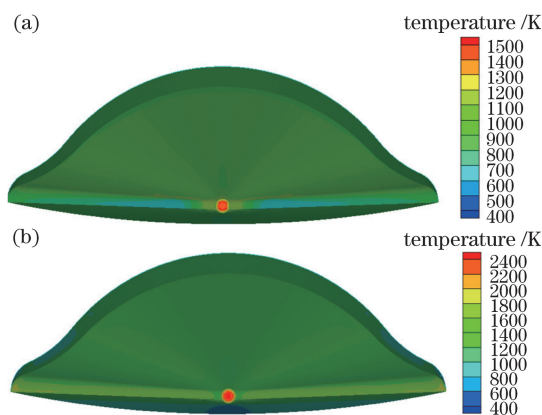


图 6 飞行高度为(a)30 km 和(b)50 km 时的类 HTV-2 飞行器表面温度分布

Fig. 6 Surface temperature distributions of HTV-2-like aircraft at altitudes of (a) 30 km and (b) 50 km

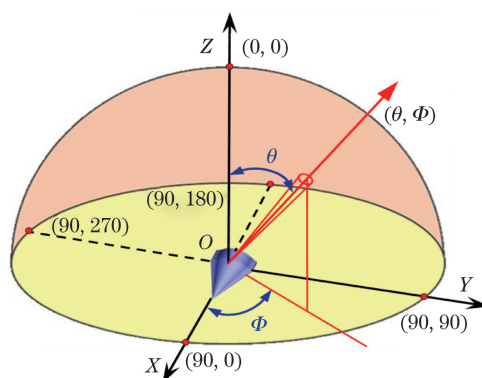


图 7 观测角度示意图

Fig. 7 Diagram of observation angle

图 8 给出了目标在 30 km 和 50 km 飞行高度下 1~14 μm 波段内的光谱辐射强度计算结果,观测方向依次为 X、Y 和 Z 轴。在相同高度下,俯视观测($\theta=0^\circ, \Phi=0^\circ$)时,目标的光谱辐射强度最大,前视($\theta=90^\circ, \Phi=0^\circ$)时辐射强度最小。从图 8 中可以看出,30 km 飞行高度下辐射光谱的峰值对应波长约为 3 μm ,50 km 飞行高度下峰值波长变为 2 μm ,这主要是 50 km 飞行高度下表面温度升高导致的。观测角度相同时,50 km 飞行高度下的光谱辐射强度要高于 30 km 下的。

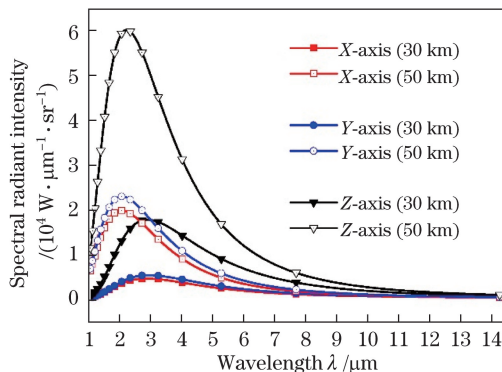


图 8 不同观测方向上的光谱辐射强度分布

Fig. 8 Spectral radiation intensity distribution at different observation directions

目标飞行高度为 30 km 时,典型观测平面内中红外(3~5 μm)和长红外(8~12 μm)谱带的强度分布如图 9 所示。图 10 所示为观测平面示意图,YOZ 平面中 Z 轴正半轴为起始 0° ,Y 轴正半轴为 90° ;XOZ 平面中 Z 轴正半轴为起始 0° ,X 轴正半轴为 90° ;XOY 平面 X 轴正半轴为起始 0° ,Y 轴正半轴为 90° 。目标结构关

于 XOZ 平面对称,故 YOZ 和 XOY 平面内辐射强度对称分布。目标辐射强度最大时的观测方向为 $\theta=20^\circ$, $\Phi=0^\circ$ 。相同条件下, $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段内的辐射强度明显大于 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段的。图 11 所示为 $30\ \text{km}$ 和 $50\ \text{km}$ 飞行高度下目标在 YOZ 平面 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段内总的辐射强度大小。目标在 $50\ \text{km}$ 高度下各个方向的辐射强度都要高于 $30\ \text{km}$ 的情况,这主要是 $50\ \text{km}$ 高度下目标飞行速度快、表面温度较高导致的。

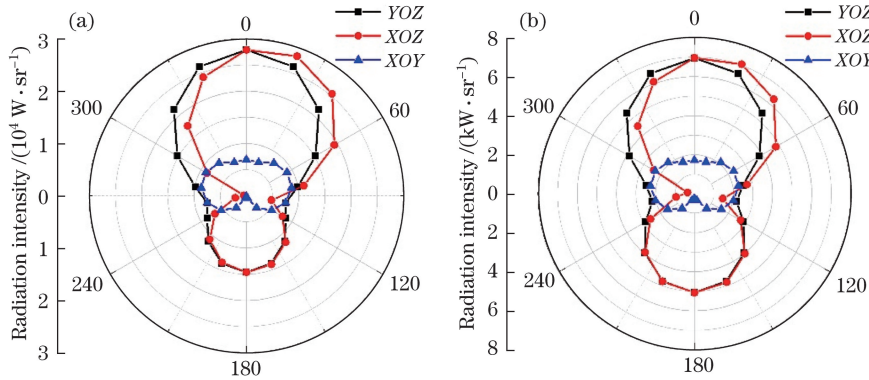


图 9 不同观测平面波段内的总辐射强度。(a) $3\sim 5\ \mu\text{m}$; (b) $8\sim 12\ \mu\text{m}$

Fig. 9 Total radiation intensities in different observation plane bands. (a) $3\sim 5\ \mu\text{m}$; (b) $8\sim 12\ \mu\text{m}$

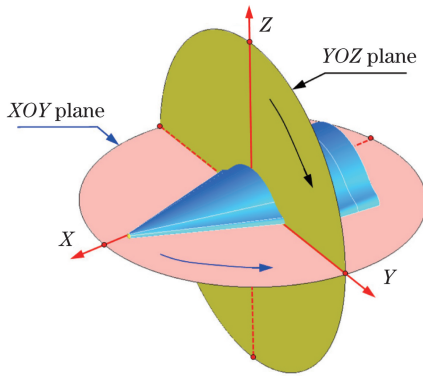


图 10 观测平面示意图

Fig. 10 Diagram of observation plane

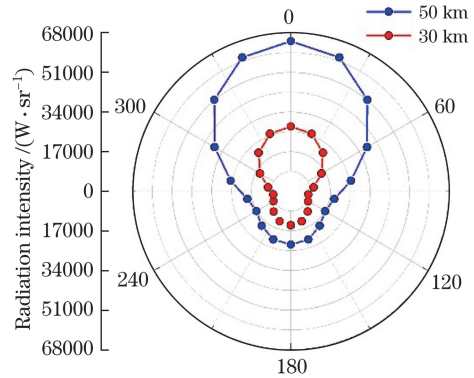


图 11 YOZ 平面 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段内的不同飞行高度下的总辐射强度

Fig. 11 Total radiation intensities in $3\sim 5\ \mu\text{m}$ band under different flight heights in YOZ plane

3 红外系统作用距离模型

当目标距离红外探测系统较远时,目标的像不能充满探测器单元,因此可将目标视为点源。在探测波段 $\lambda_1\sim\lambda_2$ 内,目标在红外系统入瞳上总的辐照度是目标本体辐射经大气衰减后到达入瞳的辐照度和目标所张立体角内路径辐射在入瞳上的辐照度之和^[19],则

$$E_t = \frac{I_t(B/R^2)}{B} + L_{\text{path}}\omega_t = \frac{1}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [I_{\lambda}\tau(\lambda, R) + L_{\text{path},\lambda}A_t]d\lambda, \quad (2)$$

式中 R 为目标与探测器间的距离, I_t 为 $\lambda_1\sim\lambda_2$ 波段内目标总辐射强度; B 为传感器入瞳面积, L_{path} 为 $\lambda_1\sim\lambda_2$ 波段内目标到探测器入瞳之间的路径辐射亮度, $\omega_t = A_t/R^2$ 为目标对光学系统中心所张的立体角, A_t 为目标观测方向上总的可见面积, $\tau(\lambda, R)$ 为传输距离为 R 时的大气光谱透过率。

当考虑大气背景噪声时,大气背景在红外系统入瞳上的辐照度为

$$E_{\text{bg}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\omega - \omega_t)L_{\text{bg}\lambda} \cdot d\lambda, \quad (3)$$

式中 ω 为红外系统的瞬时视场立体角, $L_{\text{bg}\lambda}$ 为大气背景光谱辐射亮度。当背景完全充满探测器单元时,红外

系统入瞳上的辐照度为

$$E' = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \omega L_{bg\lambda} \cdot d\lambda \quad (4)$$

从而,目标在入瞳上的辐照度 $E = E_t + E_{bg}$ 与背景辐照度 E' 之差为

$$\Delta E = \frac{1}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [I_\lambda \tau(\lambda, R) + L_{path,\lambda} A_t - L_{bg\lambda} A_t] d\lambda \quad (5)$$

点目标的作用距离采用信噪比模型^[19-20]计算,即

$$R_{SN} = \Delta E / N_{EFD} \quad (6)$$

式中 N_{EFD} 为红外系统的噪声等效辐照度(即系统的灵敏度)。则

$$R = \left\{ \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [I_\lambda \tau(\lambda, R) + L_{path,\lambda} A_t - L_{bg\lambda} A_t] d\lambda}{R_{SN} \cdot N_{EFD}} \right\}^{1/2} \quad (7)$$

该作用距离计算模型基于理想传感器,使用 N_{EFD} 参数估算作用距离,作用距离方程简洁,且方便工程计算^[19]。

由于大气分子具有强烈的光谱选择性,因此利用大气辐射传输专业软件 MODTRAN 计算不同传输方向、不同探测高度下的大气透过率、大气背景辐射及大气路径辐射。MODTRAN 中选取的模型参数如下:大气条件为 1976 年美国标准大气模型,地表的反射率模型为海洋模型,气溶胶模型为海军海洋模型。

4 不同平台的探测性分析

最大作用距离是表征红外探测系统性能以及目标可探测性的一个重要指标。由于类 HTV-2 目标红外辐射在各个方向上不同,在计算最大探测距离时,选取目标辐射强度最大的方向为探测器探测方向,然后结合不同的传感器性能参数,分析不同探测平台对类 HTV-2 目标的最大探测距离。

红外传感器灵敏度对探测距离的影响比较大,根据文献[21]报道的美国 MSX 卫星相关数据,同时为增加本文计算的作用距离的普适性,选取的灵敏度依次为 $10^{-10}, 10^{-12}, 10^{-14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,同时将其对应的探测距离分别记为 R_1, R_2, R_3 。地基平台和浮空平台传感器的探测波段为中波红外 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 和 $3.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$,长波红外 $7.7 \sim 9.5 \mu\text{m}$ 和 $8.0 \sim 12.0 \mu\text{m}$ 。天基平台探测时,探测背景为地表,背景辐射复杂多变,因此天基红外预警卫星通常选用大气吸收波段以降低地球与大气背景对探测的影响^[22]。分别选取探测波段为中波红外 $3.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 、长波红外 $8.0 \sim 12.0 \mu\text{m}$ 、大气吸收波段 $2.70 \sim 2.95 \mu\text{m}$ 和 $4.20 \sim 4.45 \mu\text{m}$ 进行天基平台探测距离的计算。三种探测平台下,信噪比均为 5.0 时,认为满足探测要求。

4.1 地基平台作用距离分析

远距离地基探测时,需要考虑地球曲率半径($R_E = 6371 \text{ km}$)的影响。图 12 所示为地基平台探测示意图,其中 H 为前文提到的目标飞行器的飞行高度。当 H 分别为 30 km 和 50 km 时,地基平台理论可探测距离最大值分别为 619.0 km 和 799.7 km 。

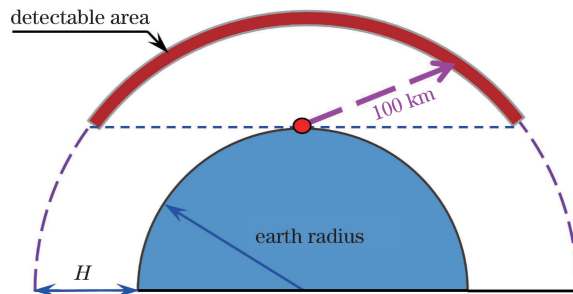


图 12 地基平台探测示意图

Fig. 12 Detection diagram of ground-based platform

地基平台探测时,背景为深空背景,当探测距离为 100 km,地基平台探测飞行高度 30 km 下的目标时,大气衰减前后的目标红外辐射及大气背景辐射大小如图 13 所示,探测方向如图 12 中虚线箭头所示。

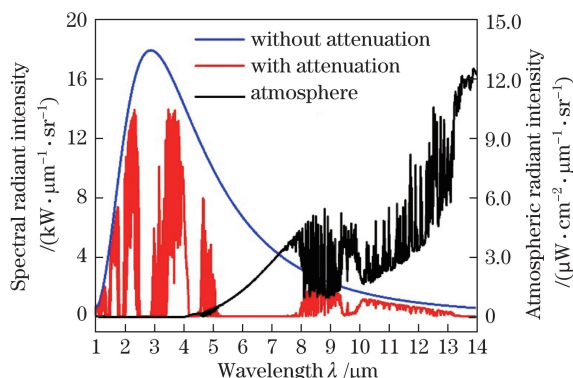


图 13 大气衰减前后目标辐射强度及背景辐射强度

Fig. 13 Target radiation intensity with or without atmospheric attenuation and background radiation intensity

表 2 给出了地基平台探测时不同波段内的最大探测距离。红外传感器灵敏度越大(N_{EFD} 越小),探测距离越大。相同条件下,中波波段的探测距离要比长波波段的长。在 3.0~5.0 μm 波段,当红外传感器灵敏度为 $10^{-14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,目标飞行高度为 30 km 时地基最大探测距离为 567.5 km,目标飞行高度为 50 km 时地基最大探测距离为 761.5 km。

表 2 地基平台最大探测距离

Table 2 Maximum detection distance of ground-based platform

Condition	Wavelength / μm	3.7-4.8		3.0-5.0		7.7-9.5		8.0-12.0	
	Altitude /km	30	50	30	50	30	50	30	50
R_1 /km		36.7	55.2	48.5	75.7	23.8	29.6	31.9	39.6
R_2 /km		212.8	325.1	255.5	391.2	159.5	213.7	201.7	270.5
R_3 /km		543.9	735.1	567.5	761.5	479.8	641.4	503.3	671.8

4.2 浮空平台作用距离分析

临近空间浮空平台探测通常利用高空气球或平流层飞艇携带红外探测器对临近空间目标进行探测,高空气球飞行高度可达 30~50 km,平流层飞艇高度一般在 20 km 左右。研究高度为 35 km 的浮空平台对典型飞行高度下类 HTV-2 目标的最大探测距离,图 14 所示为浮空平台探测示意图。受地球曲率影响,浮空平台探测 30 km 和 50 km 飞行高度下的目标时,理论最大探测距离分别为 1287.7 km 和 1468.5 km。

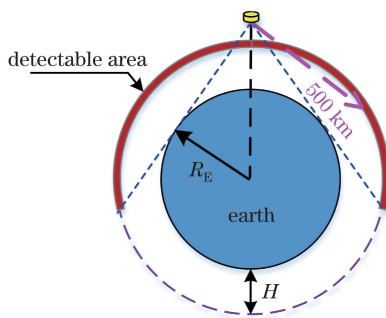


图 14 浮空平台探测示意图

Fig. 14 Detection diagram of floating platform

浮空平台探测时,背景多为临边背景,当探测距离为 500 km,浮空平台探测飞行高度 30 km 下的目标时,大气衰减前后的目标红外辐射及大气背景辐射大小如图 15 所示,探测方向如图 14 中虚线箭头所示。

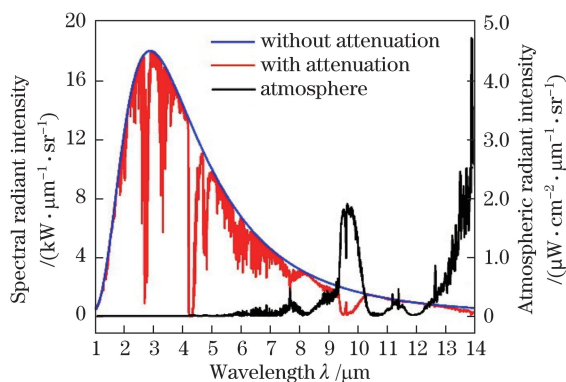


图 15 大气衰减前后目标辐射强度及背景辐射强度

Fig. 15 Target radiant intensities with/without atmospheric attenuation and background radiation intensity

浮空平台探测时不同波段内的最大探测距离见表 3。当红外传感器的灵敏度为 $10^{-14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,四个波段的最大探测距离均超过浮空平台的理论最大可探测距离(表 3 中距离 R_3 添加括号表示),此时该浮空平台在其可探测区域内均能探测到目标。

表 3 浮空平台最大探测距离

Table 3 Maximum detection distance of floating platform

Condition	Wavelength / μm	3.7-4.8		3.0-5.0		7.7-9.5		8.0-12.0	
	Altitude /km	30	50	30	50	30	50	30	50
R_1 /km		49.7	76.3	71.9	112.2	30.2	38.4	36.3	45.9
R_2 /km		454.6	696.5	653.5	989.9	288.5	375.8	340.8	443.3
R_3 /km		(1287.7)	(1468.5)	(1287.7)	(1468.5)	(1287.7)	(1468.5)	(1287.7)	(1468.5)

4.3 天基平台作用距离分析

为研究天基卫星的最大探测距离,选取三种观测方向 a、b、c,如图 16 所示。

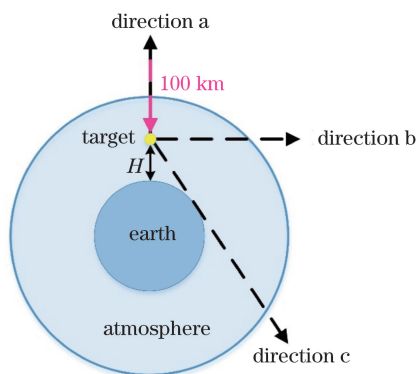


图 16 天基卫星探测示意图

Fig. 16 Detection diagram of space-based satellite

当探测距离为 100 km,天基平台探测飞行高度 30 km 下的目标时,大气衰减前后的目标红外辐射强度及大气背景辐射强度如图 17 所示,探测方向如图 16 所示。临近空间高超声速目标的飞行高度较高,目标上空由平流层顶部区域、中间层和电离层组成,该区域大气稀薄,大气透过率较大,故红外探测器入瞳的辐射强度较大。

天基平台探测的方向较多,故对天基平台而言,规定 R_{ij} 为其探测距离,其中 i 表示探测方向(1 为探测方向 a,2 为探测方向 b,3 为探测方向 c), j 表示灵敏度(1 为 $10^{-10} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,2 为 $10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,3 为 $10^{-14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)。中波、长波及吸收波段的最大探测距离计算结果见表 4。相同条件下,2.70~2.95 μm 波段内的最大探测距离比 4.20~4.45 μm 波段的大。在探测方向为 a 和 b 且目标辐射强度不变的情况下,最大探测距离主要由灵敏度决定, N_{EFD} 减小了两个量级,最大探测距离增大一个量级。

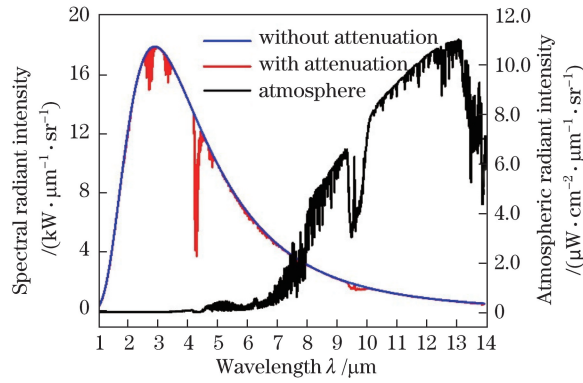


图 17 大气衰减前后目标辐射强度及背景辐射强度

Fig. 17 Target radiation intensity with or without atmospheric attenuation and background radiation intensity

表 4 天基平台在中、长波及吸收波段的最大探测距离

Table 4 Maximum detection distances of space-based platform in medium, long and absorption wave bands

Condition	Wavelength / μm	3.0-5.0		8.0-12.0		2.70-2.95		4.20-4.45	
	Altitude /km	30	50	30	50	30	50	30	50
R_{11} /km		73.7	114.7	36.6	46.1	29.6	52.0	21.4	36.3
R_{12} /km		738.4	1148.9	368.2	464.6	294.1	521.4	213.1	360.6
R_{13} /km		7385.4	11490.2	3683.2	4647.7	2943.6	5216.4	2129.4	3604.9
R_{21} /km		71.7	113.4	35.9	46.0	29.2	51.8	18.2	35.5
R_{22} /km		699.7	1138.5	345.1	461.1	273.1	515.0	133.5	335.8
R_{23} /km		6987.9	11388.6	3440.4	4613.4	2710.8	5146.1	1205.2	3347.4
R_{31} /km		70.7	112.3	35.3	45.7	29.0	51.1	17.7	35.2
R_{32} /km		383.4	570.2	304.6	399.3	205.3	372.1	96.8	208.2
R_{33} /km		575.5	765.8	537.8	714.5	387.1	573.6	205.4	374.5

5 结 论

以类 HTV-2 为研究对象,计算获得了飞行器两个典型高度(30 km 和 50 km)下的红外辐射特征数据。在此基础上,综合考虑了大气背景辐射、大气透过率及目标红外辐射方向性和光谱选择性等因素,分析了不同平台的探测能力。研究表明,目标的红外辐射强度随观测方向的变化较大;相同探测条件下,红外探测器在中波波段(3.7~4.8 μm 和 3.0~5.0 μm)对高超声速飞行器的探测能力要强于长波波段(7.7~9.5 μm 和 8.0~12.0 μm)的;同时给出了地基、空基和天基探测平台下的目标在不同波段下的最大探测距离。所研究的背景辐射为某一特定的环境背景辐射,为增加探测距离的普适性,还需进一步研究环境背景对探测距离的影响。

参 考 文 献

- [1] Hank J, Murphy J, Mutzman R. The X-51A scramjet engine flight demonstration program[C]. 15th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, Dayton, 2008: 2540.
- [2] Walker S, Sherk J, Shell D, *et al.* The DARPA/AF falcon program: The hypersonic technology vehicle #2 (HTV-2) flight demonstration phase[C]. 15th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, Dayton, 2008: 2539.
- [3] Zhao Y, Wu P, Sun W. Calculation of infrared system operating distance by spectral bisection method[J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 63: 198-203.
- [4] Li Li, Qiu Su, Jin Weiqi, *et al.* Operating distance model of near-infrared range-gated imaging system based on minimum resolvable contrast[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3481-3486.

- 李力, 裘溯, 金伟其, 等. 基于最小可分辨对比度的近红外距离选通成像系统作用距离模型[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3481-3486.
- [5] Fu Qiang, Shi Guangwei, Zhang Xin. Modeling and evaluation of infrared point-target operating range[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(8): 1991-1996.
付强, 史广维, 张新. 红外点目标作用距离数学建模与评估[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 1991-1996.
- [6] Jia Qinglian, Qiao Yanfeng, Deng Weiyuan. Analysis for point-target detection range of panoramic searching system[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(4): 937-943.
贾庆莲, 乔彦峰, 邓文渊. 周视搜索系统对点目标的作用距离分析[J]. 光学学报, 2009, 29(4): 937-943.
- [7] Huang F, Wang Y, Shen X, *et al.* Analysis of space target detection range based on space-borne fisheye imaging system in deep space background[J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(6): 475-480.
- [8] Ren K, Tian J, Gu G, *et al.* Operating distance calculation of ground-based and air-based infrared system based on Lowtran7[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 77: 414-420.
- [9] Zhou Jinwei, Li Jicheng, Shi Zhiguang, *et al.* Research on infrared detectability of hypersonic vehicle[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0504001.
周金伟, 李吉成, 石志广, 等. 高超声速飞行器红外可探测性能研究[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0504001.
- [10] Zhang Ying, Niu Yanxiong, Yang Lu, *et al.* Analysis and study on detection capability of satellite photoelectric imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0111004.
张颖, 牛燕雄, 杨露, 等. 星载光电成像系统探测能力分析与研究[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0111004.
- [11] Kou Tian, Wang Haiyan, Wu Xueming, *et al.* Detection probability envelope of airborne photoelectric system in complex condition[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0304002.
寇添, 王海晏, 吴学铭, 等. 复杂环境下机载光电系统探测概率包线研究[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0304002.
- [12] Yang Lu, Niu Yanxiong, Lü Jianming, *et al.* Influence of attitude variation on the detection ability of satellite photoelectric imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1223002.
杨露, 牛燕雄, 吕建明, 等. 姿态变化对星载光电成像系统探测能力的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1223002.
- [13] Acton J M. Hypersonic boost-glide weapons[J]. Science & Global Security, 2015, 23(3): 191-219.
- [14] Surzhikov S T, Shang J S. Three dimensional simulation of shock layer ionization for RAM-C II flight tests[C]. 52nd Aerospace Sciences Meeting, National Harbor, 2014: 1078.
- [15] Dong Weizhong, Gao Tiesuo, Ding Mingsong, *et al.* Numerical study of coupled surface temperature distribution and aerodynamic heat for hypersonic vehicles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(1): 311-324.
董维中, 高铁锁, 丁明松, 等. 高超声速飞行器表面温度分布与气动热耦合数值研究[J]. 航空学报, 2015, 36(1): 311-324.
- [16] Keenan J A, Candler G V. Simulation of ablation in earth atmospheric entry[C]. 28th Thermophysics Conference, Fluid Dynamics and Co-located Conferences, Orlando, 1993: 2789.
- [17] 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, 2006: 8122.
- [18] Niu Qinglin, He Zhihong, Wang Zhenhua, *et al.* Study on infrared radiation characteristics of HTV-2 type vehicle[C]. Chinese Society of Engineering Thermophysics, 2016: 766.
牛青林, 贺志宏, 王振华, 等. 类 HTV-2 飞行器红外辐射特性研究[C]. 中国工程热物理学会学术会议, 2016: 766.
- [19] Mao Xia, Chang Le, Diao Weihe. Estimation for detection probability of infrared point target under complex backgrounds[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(11): 1429-1434.
毛峡, 常乐, 刁伟鹤. 复杂背景下红外点目标探测概率估算[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(11): 1429-1434.
- [20] Li Runshun, Yuan Xiangyan, Fan Zhigang, *et al.* Operating range prediction of infrared imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 30(1): 1-3.
李润顺, 袁祥岩, 范志刚, 等. 红外成像系统作用距离的估算[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(1): 1-3.
- [21] Sessler A M, Cornwall J M, Dietz B, *et al.* Countermeasures: A technical evaluation of the operational effectiveness of the planned US national missile defense system[EB/OL]. (2000-04-15) [2017-03-27]. http://www.ucsusa.org/assets/documents/nwgs/cm_all.pdf.
- [22] 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.
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.