

高超声速飞行器红外可探测性能研究

周金伟 李吉成 石志广 陈小天 卢晓卫

国防科学技术大学ATR重点实验室, 湖南 长沙 410073

摘要 以高超声速乘波体为例, 针对稀薄大气空间高超声速目标的红外可探测性能进行分析研究。采用工程算法计算了不同飞行条件下的飞行器驻点热流分布, 由此得到其辐射平衡温度; 采用小区间求和方法计算大气对红外辐射的传输衰减作用; 考虑了目标与背景辐射强度差异、点目标成像的弥散现象对探测器作用距离的影响, 建立了新的红外探测系统作用距离计算模型。仿真实验表明, 弥散系数随着目标探测器间距离而变化; 随着飞行器飞行速度的增加, 系统对目标的探测距离增大, 同时与长波段相比, 中短波段时的探测距离更大。外场试验结果表明, 与现有算法相比, 本文方法具有较高精度。

关键词 探测器; 高超声速飞行器; 红外辐射; 弥散; 作用距离

中图分类号 TK124 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0504001

Research of Infrared Detectability of Hypersonic Vehicle

Zhou Jinwei Li Jicheng Shi Zhiguang Chen Xiaotian Lu Xiaowei

ATR Key Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Taking hypersonic waverider for example, the infrared detectability of hypersonic object in rarefied atmosphere space is researched. Heat flux distribution of the stagnation point as well as radiation-equilibrium temperature is calculated under different flying conditions with engineering algorithms; then atmospheric transmittance is calculated by summation over small intervals. After considering both effects of radiation difference between object and background, and dispersion on detector's operating range, a new model for calculation operating range of infrared detection system is built. By simulation, dispersion coefficient has varied with distance between object and detector; meanwhile, the higher the velocity of object is, the further the operating range is. When compared with long-wave spectrum, detector working at short-medium spectrum has better operating range. By field test, proposed algorithm has high accuracy when compared with existing models.

Key words detectors; hypersonic vehicle; infrared radiation; dispersion; operating range

OCIS codes 040.3060, 040.6808, 280.4788, 120.1880

1 引言

稀薄大气空间高超声速飞行器一般距离地面 20~100 km 之间, 飞行速度大于 $5Ma$, 且具有反应速度快、大范围机动、生存能力强等特点。目前, 国内外主要针对巡航导弹、飞机、弹道导弹等目标的红外可探测性进行了大量理论研究和仿真实验验证, 但在高超声速飞行器可探测性方面研究较少。如 McIntyre 等^[1]采用地基探测器得到了“隼鸟号”探测器再入阶段的可见光和近红外波段光谱; Huang 等^[2]针对深空背景下星载鱼眼成像系统的空间目标探测, 建立了该系统工作距离计算模型, 该模型没有考虑大气对红外辐射的吸收作用,

收稿日期: 2014-09-30; 收到修改稿日期: 2014-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(61302145、61101185)

作者简介: 周金伟(1983-), 男, 博士研究生, 主要从事光学成像、目标识别技术方面的研究。

E-mail: zhoujinwei863@sina.com.cn

导师简介: 李吉成(1970-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学成像目标识别技术方面的研究。

E-mail: peter0516@126.com(通信联系人)

不适合于地面探测;肖喜中等^[13]研究了飞机红外光谱特性的多光谱测量问题;常松涛等^[14]研究了红外小目标的辐射测量方法;黄欣^[15]等研究了外部因素对光电跟踪系统低对比度目标捕获能力的影响;刘朝晖等^[16]研究地基探测器对再入段导弹的红外探测性能时,将工作波段内大气透射率简化为常量,忽视了其具有波段选择性且随传输距离而变化;张己化等^[17]针对地基光电系统对空间目标的探测,分析了背景亮度、系统参量以及像点弥散对探测能力的影响;刘莹奇等^[18]研究了空间目标的地基红外辐射特性测量研究;毛峡等^[9]基于噪声等效辐照度推导得到了点目标作用距离模型,马鹤等^[10]采用小区间求和方法计算总辐射功率,避免了采用平均透射率带来的误差,Zhao等^[11]考虑到辐射传输透射率受大气散射、吸收、环境和传输距离综合影响,但三人都没有考虑点目标的成像弥散现象对系统作用距离的影响。

本文针对稀薄大气空间高超声速乘波体飞行器的地基红外探测性能进行了研究。首先采用工程算法计算气动加热和辐射平衡温度;考虑到大气传输透射率的波段选择性以及距离相关性、点目标成像弥散现象及其随探测距离变化,建立了一种新的红外系统作用距离计算模型。本文所考虑的探测器工作波段为3~5 μm 以及 8~12 μm。

2 高超声速飞行器气动性能分析与计算

高超声速飞行器在稀薄大气空间飞行时,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。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。

研究的乘波体飞行速度为6~10Ma,在计算飞行器面热流分布时,采用工程预测算法,将飞行器分为头部驻点区域、鼻区、迎风面、背风面等区域分别进行计算。由于通常高超声速目标与探测器间距离较远,可视作点目标,且头部驻点区域的温度远高于飞行器其它区域以及尾流温度,故将头部驻点区域的平衡温度当做飞行器表面温度。

为了减少气动热对飞行器的损害,通常需要对飞行器头部进行钝化处理。考虑到钝化后飞行器结构特点,采用 Vanmol 经验公式^[12]计算驻点处热流密度 Q_{st} (单位为 W/m^2)。

$$Q_{st} = \sqrt{\frac{1+K}{2}} \times 1.90 \times 10^{-4} \times V_{\infty}^3 \times \left(1 - \frac{H_w}{H_0}\right) \times \sqrt{\frac{\rho_{\infty}}{R_y}}, \quad (1)$$

式中修正因子 $K = \min(R_x/R_y, R_y/R_x)$, R_x 和 R_y 分别表示驻点处横向和纵向钝化后曲率半径(单位为 m); H_w 和 H_0 分别表示壁面焓值和来流总焓值,单位均为 kJ/kg ; ρ_{∞} 表示来流密度(单位为 kg/m^3)。当 $K=1$ 时,椭球构型变为轴对称球头模型;当 $K=0$ 时,椭球构型退化为二维圆柱模型。

在计算辐射平衡温度时,考虑到飞行器表面和来流之间的对流传热 $Q_{w,c}$ 以及辐射传热 $Q_{w,r}$,有

$$Q_{w,c} = Q_{w,r} = \varepsilon \sigma (T_{\infty}^4 - T_{eq}^4), \quad (2)$$

式中 T_{∞} 和 T_{eq} 分别表示来流温度和辐射平衡温度; ε 表示飞行器表面发射率; σ 表示斯蒂芬-波尔兹曼常量。对于驻点处,则有 $Q_{st} = Q_{w,c}$ 。

3 大气辐射传输衰减作用

为计算达到探测器处的目标辐射强度,必须考虑大气对红外辐射的传输衰减作用,可用消光系数 $\mu(\lambda)$ 来表征。

$$\mu(\lambda) = \mu_{H_2O}(\lambda) + \mu_{CO_2}(\lambda) + \mu_s(\lambda) + \mu_c, \quad (3)$$

式中 $\mu_{H_2O}(\lambda)$ 和 $\mu_{CO_2}(\lambda)$ 分别表示由水蒸气和 CO_2 吸收而引起的光谱衰减系数; $\mu_s(\lambda)$ 表示大气分子与气溶胶的光谱散射系数; μ_c 表示大气气象条件引起的衰减系数,可认为该系数与波长无关。给定传输距离后,通常采用平均透射率来衡量大气对红外辐射传输衰减作用,其优点是计算简单,不足之处是没有考虑大气传输作用具有波段选择性以及传输距离对透射率的影响。当传输距离已知时,不少文献采用大气辐射传输软件 LOWTRAN 或 MODTRAN 等提高透射率计算精度。

根据 HITRAN 数据库^[13],采用逐线计算方法得到压强 $P=1.0$ atm, 温度 $T=296$ K, 且体积分数 $X_{H_2O}=0.014$ 、

$X_{\text{CO}_2}=0.00033$ 时 H_2O 和 CO_2 在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 以及 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 的吸收系数 k (单位为 cm^{-1})见图 1。

由此可见,在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段内水汽和 CO_2 对辐射吸收衰减作用明显要强于波段 $8\sim 12\ \mu\text{m}$,且 CO_2 在波长 $4.3\ \mu\text{m}$ 附近处有个强吸收带。在波段 $8\sim 12\ \mu\text{m}$,水汽的吸收起主要作用。逐线计算方法精度较高,但是计算量大。由于采用 LOWTRAN 或 MODTRAN 软件计算大气透射率时,需要给定传输路径长度等参数,而探测距离未知则限制了此类软件应用。为此,根据现有经验数据采用工程算法拟合计算透射率。

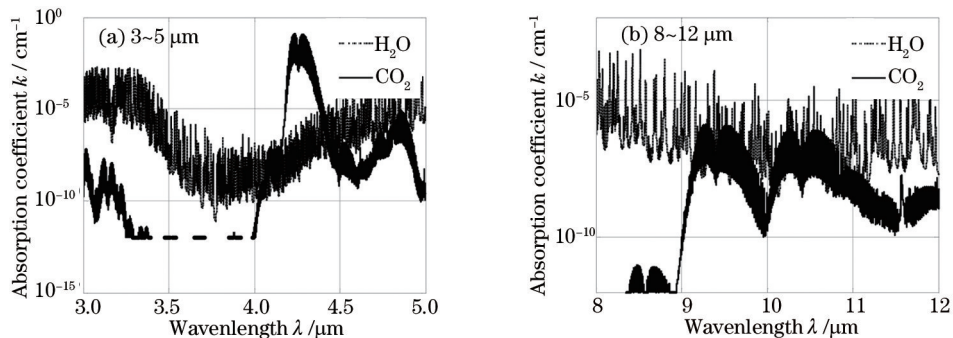


图 1 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 以及 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 范围内 CO_2 和 H_2O 的吸收系数 k

Fig.1 Absorption coefficient k of CO_2 and H_2O in $3\sim 5\ \mu\text{m}$ and $8\sim 12\ \mu\text{m}$

求解水蒸气的光谱衰减系数 $\mu_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ 时,需要计算该路程长度内可凝结水量 W (单位为 mm),且 $W=\rho_w x/\rho_0$,其中 ρ_w 表示绝对湿度(单位为 g/m^3), x 表示水平路程(单位为 km), ρ_0 表示水密度,取值为 $10^6\ \text{g}/\text{m}^3$ 。若海拔 H 处水平路程 x 的透射率为 τ ,相同透射率对应等效海平面上水平路程为 x_0 ,考虑到温度、压强、湿度随高度 H 变化关系,拟合得到 $x=x_0\exp(-\beta H)$,其中 x 、 x_0 和 H 单位均为 km ,且对于水蒸气,有 $\beta=0.5154$,对于 CO_2 ,有 $\beta=0.313^{[14]}$ 。

红外辐射传输通常为倾斜路径,因此需要将倾斜路程 S 转化为海平面的等效水平路程 R 。若探测器和目标高度分别为 H_0 和 H_d (单位均为 km),探测方向水平倾角为 θ ,得到等效水平路程 R (单位为 km)。

$$R = \frac{1}{\beta \sin \theta} [\exp(-\beta H_d) - \exp(-\beta H_0)] = \frac{\exp(-\beta H_d)}{\beta \sin \theta} [1 - \exp(-\beta \sin \theta S)]. \quad (4)$$

若目标飞行高度 H_0 固定,则水平倾角 θ 满足 $\sin \theta = (H_0 - H_d)/S$,进而有,

$$R = \frac{S}{\beta(H_0 - H_d)} [\exp(-\beta H_d) - \exp(-\beta H_0)]. \quad (5)$$

计算等效海平面可凝结水量 W_c 以及 CO_2 有效路径长度 L_c ,其中 $W_c=\rho_w R$, $L_c=R$,然后通过查表即可得到对应的透射率 $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ 和 $\tau_{\text{CO}_2}(\lambda)$ 。

对于 $\lambda > 1\ \mu\text{m}$ 的红外波段,大气分子和气溶胶对辐射传输的透射率 $\tau_s(\lambda, S)$ 以及气象条件对辐射传输的作用 $\tau_c(\lambda, S)$ 可表达为,

$$\begin{cases} \tau_s(\lambda, S) = \exp\left[-\frac{3.91}{V_m} \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^q S\right] \\ \tau_c(\lambda, S) = \exp[-0.66 J_r^{0.66} S - 6.5 J_s^{0.7} S] \end{cases}, \quad (6)$$

式中 V_m 表示波长 $0.55\ \mu\text{m}$ 时的大气能见度(单位为 km); q 为经验常数,其取值与气象视程 V_m 有关; J_r 和 J_s 分别表示与气象条件有关的降雨、降雪强度(单位均为 mm/h)。

综合以上分析,得到大气透射率计算公式,

$$\tau_a(\lambda, S) = \tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda, S) \times \tau_{\text{CO}_2}(\lambda, S) \times \tau_s(\lambda, S) \times \tau_c(\lambda, S). \quad (7)$$

当斜距 $S=60\ \text{km}$,水平探测倾角 $\theta=30^\circ$,大气温度 $T=298.15\ \text{K}$,大气能见度 $V_m=50\ \text{km}$,相对湿度 RH 为 8.0% ,天气晴朗无云雨天气时,计算得到 $2.0\sim 13.9\ \mu\text{m}$ 波段范围内的大气透射率见图 2。可知,计算结果与 LOWTRAN7.0 结果很符合。

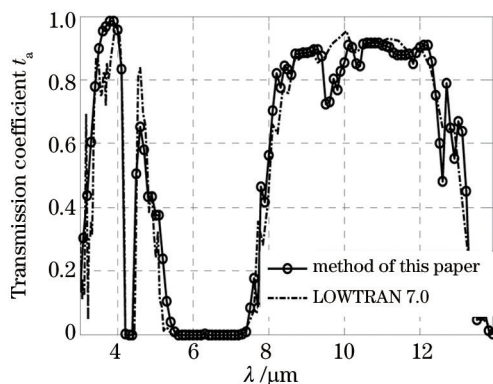


图2 波段 2.0~13.9 μm 内大气透射率

Fig.2 atmospheric transmittance τ_a between 2.0~13.9 μm

4 红外探测器性能

衡量红外成像系统对点目标探测性能的重要指标是作用距离和探测概率,下面将对系统的作用距离进行研究。

4.1 目标成像像元大小

目标在红外探测器焦平面上成像大小 D 与目标到探测器间距离 R 、焦距 F 以及目标的实际尺寸 r 等有关。若令单个像元所对应的瞬时视场角为 w , 满足 $w=D/F$, 则实际尺寸为 r 的目标在探测器像平面所成图像像素数 n 满足 $\tan(nw/2)=r/R$ 。定义临界距离 $R_0 = r/\tan(w/2)$, 可见临界距离 R_0 随目标等效尺寸(或有效投影面积)增大而增大。有效投影面积越小, R_0 越小。当 $R \geq R_0$ 时, 飞行器将成像为点目标, 此时必须考虑成像的弥散现象对探测器性能的影响。

4.2 点目标成像的弥散现象

由于目标运动以及系统不稳定, 探测器上点目标成像会产生弥散现象, 可用弥散系数 $k = \sigma^2/\sigma_s^2$ 来表征, 其中 σ_1 表示目标等效直径对探测器张角的均方根值; σ_s 表示实际像点弥散斑对系统张角的最大均方根值, 且有 $\sigma_s^2 = \sigma_1^2 + \sum \sigma_i^2$, 其中 $\sigma_i (i=1, \dots, 6)$ 含义见文献[15]。当 $\sigma_i (i=1, \dots, 6)$ 不变时, 弥散系数 k 随 σ_1 增大而增大, 且 $0 < k < 1$ 。设目标投影面积为 S_1 , 目标-探测器距离为 R , 则目标张角的均方根值 σ_1 (单位为 $''$)为:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2\sqrt{3}} \times \frac{\sqrt{S_1}}{R} \times \frac{180 \times 3600}{\pi}, \quad (8)$$

式中系数 $1/(2\sqrt{3})$ 是为了将结果折算为等概率分布。可知 σ_1 与探测距离 R 成反比, 与有效投影面积 S_1 方根成正比。进一步可知弥散系数 k 为探测距离 R 的函数, 将其视作常量将会引起较大误差。像点弥散将增加目标成像像元数, 致使成像能量分散, 信噪比和对比度均下降, 使得光学系统的探测能力下降。

4.3 探测器作用距离模型构建

传统的红外搜索系统作用距离仅考虑了目标辐射强度, 而忽略了背景辐射以及点目标弥散对探测距离影响。令探测器瞬时视场面积为 wR^2 , 目标投影面积为 S_1 , 则背景面积可表示为 $wR^2 - S_1$ 。实际上, 当目标与探测器距离大于临界距离 R_0 时, 探测器瞬时视场内除了有目标外, 还往往有背景。红外系统所获取的目标与背景辐射强度差 ΔI_λ 为

$$\Delta I_\lambda = \frac{kS_1\varepsilon_1 M_{t,\lambda}}{\pi} + \frac{(wR^2 - S_1)\varepsilon_b M_{b,\lambda}}{\pi} - \frac{wR^2\varepsilon_b M_{b,\lambda}}{\pi} = \frac{S_1}{\pi} (k\varepsilon_1 M_{t,\lambda} - \varepsilon_b M_{b,\lambda}), \quad (9)$$

式中 ε_1 和 ε_b 分别表示目标和背景的辐射发射率, $M_{t,\lambda}$ 和 $M_{b,\lambda}$ 分别表示目标和背景的光谱辐射出射度 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$]。可知, 弥散系数 k 越大, 则目标与背景辐射强度差 ΔI_λ 越大。在波段 $\lambda_a \sim \lambda_b$ 范围内, 点源目标与背景在探测器入瞳处的辐照度差 ΔE 为:

$$\Delta E = \frac{1}{R^2} \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \Delta I_\lambda \times \tau_a(\lambda) d\lambda. \quad (10)$$

由于(10)式需要进行积分运算,不少文献采用平均透射率 $\bar{\tau}_a$,忽略了大气吸收作用具有波段选择性以及受传输距离影响,但当波长范围较大时会产生一定误差。以波长3~12 μm 为例,若大气透射率分布同图2,计算得到当目标温度在500~2900 K变化时,采用平均透射率计算的误差曲线(见图3)。

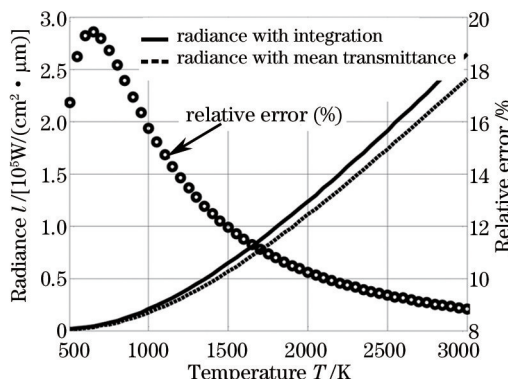


图3 平均透射率产生的误差曲线

Fig.3 Effect of atmospheric selective absorption on radiative transmission

图3中,曲线“—”和“---”分别表示采用积分运算和采用均值透射率得到的结果,曲线“o”表示平均透射率方法产生的误差。由此可见,当工作谱段较大时,采用平均透射率会产生一定的误差,如图3中当温度低于2000K时,误差将超过10%。为此,采用分段求和方法,将波段 $\lambda_a \sim \lambda_b$ 划分为 n 个子波段,计算每个子波段 $[\lambda_i \sim \lambda_{i+1}] (i=1, \dots, n)$ 内的透射率 $\tau_{a,i}$ 以及目标与背景辐射强度差 ΔI_i ,记 $\Delta \lambda_i = \lambda_{i+1} - \lambda_i$,进而得到,

$$\Delta E = \frac{1}{R^2} \sum_{i=1}^n \Delta I_i \tau_{a,i} \Delta \lambda_i, \quad (11)$$

记向量 $\Delta I = [\Delta I_1 \Delta \lambda_1 \Delta I_2 \Delta \lambda_2 \dots \Delta I_n \Delta \lambda_n]$, 向量 $\tau_a = [\tau_{a,1} \tau_{a,2} \dots \tau_{a,n}]$, 则(11)式可写为 $\Delta E = \Delta I \cdot \tau_a / R^2$ 。到达探测器的辐射功率 P (单位为W)可表示为: $P = \Delta E \times A_0 \tau_o$, 其中 A_0 表示光学系统入射孔径面积(单位为 m^2), τ_o 表示光学系统透射率。由于基于噪声等效温差的作用距离模型仅适用于对面元目标^[9], 故采用信噪比模型。假定探测器噪声为系统噪声限, 则信噪比 f_{SNR} 满足,

$$f_{\text{SNR}} = \frac{U_s}{U_n} = \frac{P}{P_{\text{NEP}}} = \frac{\Delta E \times A_0 \tau_o}{P_{\text{NEP}}} = \frac{(\Delta I \cdot \tau_a) A_0 \tau_o}{R^2 P_{\text{NEP}}}, \quad (12)$$

式中 P_{NEP} 表示噪声等效功率(单位为W)。对于焦距 F (单位为m)、光学系统入射孔径 D_0 (单位为m)的光学系统, 其数值孔径 N_A 满足 $N_A = D_0 / 2F$ 。系统噪声等效功率 P_{NEP} 可表示为 $P_{\text{NEP}} = \sqrt{A_d \Delta f} / D^*$, 其中 A_d 表示探测器面积(单位为 m^2), Δf 为系统噪声等效带宽(单位为Hz), D^* 为探测器的比探测率(单位为 $\text{m} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$)。

在考虑到背景辐射影响以及点目标的弥散作用后, 最终得到作用距离 R 的计算表达式,

$$R = [\Delta I(R) \cdot \tau_a(R)]^{1/2} \left(\frac{\pi D_0}{2} N_A \tau_o \right)^{1/2} (D^*)^{1/2} \left[\frac{K_0}{(\Delta f \cdot w)^{1/2} f_{\text{SNR}}} \right]^{-1/2}, \quad (13)$$

式中 K_0 表示信号衰减系数。本文算法与牟达^[15]模型的主要区别是: 在牟达模型中, 弥散系数 k 为常量, 使得 ΔI 为常数; 而本文中弥散系数 k 为距离 R 的函数, 使得 ΔI 也为 R 的函数。定义目标函数 $f(R)$ 为:

$$f(R) = [\Delta I(R) \cdot \tau_a(R)]^{1/2} \left(\frac{\pi D_0}{2} N_A \tau_o \right)^{1/2} (D^*)^{1/2} \left[\frac{K_0}{(\Delta f w)^{1/2} f_{\text{SNR}}} \right]^{-1/2} - R. \quad (14)$$

考虑到大气吸收的波段选择性, (14)式中大气透射率 τ_a 不能数学解析, 计算导数 $f'(R)$ 较难, 不便于采用牛顿方法求解, 为此采用逐步逼近的思想求解。通常计算得到的 R 都会大于临界距离 R_0 , 但在雨雪等特殊条件下, 计算所得 R 可能小于 R_0 , 此时成像将为面目标, 需要转入探测器对面目标的作用距离计算。

5 仿真结果与分析

以稀薄大气空间某乘波体飞行器为例, 其结构参数为^[16]: 飞行器长度 $L=3.7$ m, 头部钝化半径 $R_f=2$ cm, 且

$R_s=1.0\text{ m}$,其中上表面面积为 4.67 m^2 ,下表面面积为 4.67 m^2 ,基准面积为 0.96 m^2 ,外形见图4。

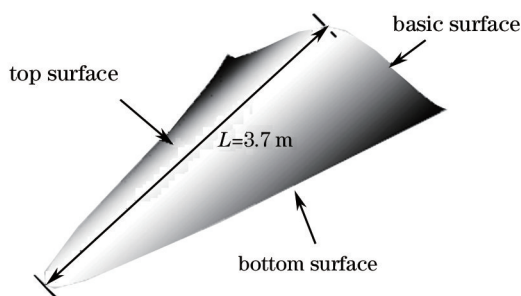


图4 乘波体结构示意图

Fig. 4 Structure of waverider

飞行高度 H 为 30 km ,飞行器表面和背景的发射率分别为 0.8 和 0.6 ,来流温度 T_∞ 为 226.5 K ,压强 P_∞ 为 $1.197\times 10^3\text{ Pa}$,密度 ρ_∞ 为 0.01841 kg/m^3 。计算得到不同飞行马赫数 Ma_∞ 时乘波体飞行器驻点处热流密度 Q_{st} 和辐射平衡温度 T_{eq} 见图5。

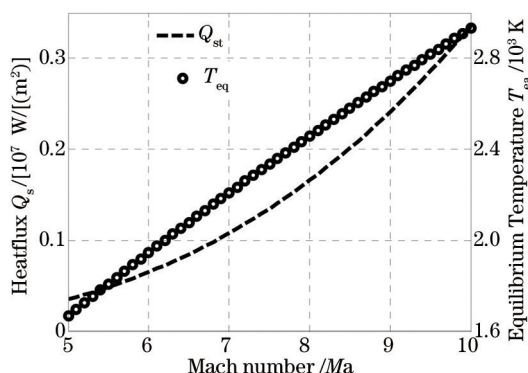


图5 不同飞行马赫数下乘波体飞行器 Q_{st} 和 T_{eq}

Fig.5 Q_{st} and T_{eq} of waverider under different Ma_∞

图5中,曲线“---”表示驻点处的热流密度曲线,“o”表示驻点区域的辐射平衡温度。可见,当飞行马赫数 Ma_∞ 增加,驻点热流密度和辐射平衡温度增加,目标的辐射能力也随之增强。

地基探测系统参数为光学系统孔径 $D_0=0.65\text{ m}$,焦距 $F=2.6\text{ m}$,光学系统透射率 $\tau_0=0.6$,探测器像素数为 $256\text{ pixel}\times 256\text{ pixel}$;探测器像素尺寸 $A_d=9.0\times 10^{-10}\text{ m}^2$;电路等效噪声带宽为 $\Delta f=100\text{ Hz}$ (中波)和 $\Delta f=1000\text{ Hz}$ (长波);平均光谱比探测率 $D^*=2.61\times 10^9\text{ m}\cdot\text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ (中波)和 $D^*=4.63\times 10^8\text{ m}\cdot\text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ (长波)。且红外探测器所处环境温度 $T_e=288.15\text{ K}$,天气晴朗,无云雨天气,大气能见度 V_m 为 50 km ,相对湿度RH为 50% 。为了便于后续的检测识别算法,系统要求具有一定的探测概率 P_d 和虚警概率 P_{af} ,不妨令 $P_d\geq 90\%$, $P_{af}\leq 1.0\times 10^{-6}$,则计算得到信噪比需满足 $f_{SNR}\geq 6.5380$,不妨取 $f_{SNR}=6.6$ 。

将不考虑点目标弥散作用(即 $k=1.0$)模型所得系统作用距离记为 R_1 ,弥散系数视作常量($k=0.2143$)模型所得系统作用距离记为 R_2 ,本文算法计算结果记为 R_3 。为验证弥散系数对作用距离的影响,首先不考虑地球曲率半径影响,不同方法计算结果见表1。

表1 天气晴朗条件下不同方法计算所得的作用距离

Table 1 Operating distance of different algorithms in sunshine day

Spectrum	3~5 μm			8~12 μm		
Ma_∞ / Ma	6.0	8.0	10.0	6.0	8.0	10.0
R_1 / km	811.20	859.54	892.31	407.69	426.97	440.13
R_2 / km	666.38	711.37	742.02	309.87	330.22	344.81
R_3 / km	333.88	354.17	368.11	182.11	190.40	196.35

由于作用距离较远,本文算法中计算所得的弥散系数 k 将小于 0.2143 。由此可见,弥散系数对红外系统

作用距离影响较大,且弥散系数 k 越大,红外系统作用距离越远。同时随着飞行马赫数 Ma_x 增加,探测器驻点热流密度 q_w 增大,目标红外辐射增强,使得探测器作用距离也增加。而且相对于长波波段,探测器在中短波波段的作用距离更远。实际上对于地基探测器来说,进行远距离探测时必须考虑地球曲率半径的影响。若目标飞行高度为 30 km,不难得到地基探测器对其最大理论可探测距离 $S_m=619.34$ km。而在 3~5 μm 波段计算得到的探测距离 R_1 、 R_2 均大于 S_m ,这超出了最大可探测距离,取 $R_1=R_2=S_m=619.34$ km。

下面分析研究不同大气条件以及飞行速度条件下高超声速点目标的可探测性。探测器参数不变,大气能见度 V_m 以及相对湿度 RH 对系统探测距离的影响见表 2。

表 2 不同大气条件以及飞行速度下的作用距离
Table 2 Operating distances with different weather and velocities

	V_m /km	RH	50		20	
			80%	50%	80%	50%
6Ma	3~5 μm	8~12 μm	330.30	333.88	246.83	248.73
			167.29	182.11	157.82	171.06
8Ma	3~5 μm	8~12 μm	350.47	354.17	258.98	260.97
			175.13	190.40	164.81	178.52
10Ma	3~5 μm	8~12 μm	364.51	368.11	267.30	269.43
			180.74	196.35	169.93	183.93

由表 2 可知,相对湿度 RH 越大,则作用距离越小,且 RH 变化对长波波段作用距离影响相对较大;而大气能见度 V_m 越大,则作用距离越大,且其变化对中短波波段作用距离大得多。在相同条件下,中短波波段的探测器作用距离要比长波波段大得多。

目前还没有公开的稀薄大气空间高超声速飞行器实验数据,我们将以 F-111 战机为例对不同算法进行比较。探测方向为尾随,目标大小为 1 m×1 m,目标辐射系数为 0.6,背景温度为 300 K,且目标与背景温差为 512 K,探测器的性能参数以及大气条件同文献[17],并同该文献中姜洪斌方法和巢时宇方法进行比较。其中姜洪斌方法没有考虑像点的弥散现象,而巢时宇方法则认为弥散系数为常量(0.2143)。定义相对误差表达式为 $f_{err}=|R-R_0|/R_0 \times 100\%$ 。不同算法的结果见表 3。

表 3 与外场试验数据比较
Table 3 Comparison with experiments

Field experiment /km	$k=1$		$k=0.2143$		Proposed algorithm	
R_0 /km	R_1 /km	f_{err} /%	R_2 /km	f_{err} /%	R_3 /km	f_{err} /%
27.7	33.50	20.94	25.50	7.94	28.17	1.70

可见,在考虑了大气透射率的波段选择性、成像弥散及其距离依赖性后,本文方法取得了与外场试验结果很近似的结果,而且精度要高于巢时宇方法以及姜洪斌方法。其原因在于姜洪斌方法没有考虑弥散现象,实际上是令弥散系数 $k=1$,由此大于实际弥散系数,故计算得到的作用距离偏大;而巢时宇方法采用常量表征弥散现象,不能反映弥散系数随目标探测器间距离的变化,当目标与探测器间较近时,常量弥散系数 0.2143 小于实际弥散系数,故计算得到的作用距离偏小。此外,若只考虑成像弥散及其距离依赖性,不考虑大气的选择性吸收,简化为波段内的平均透射率,由此计算得到的探测器作用距离为 28.60 km,相对误差 f_{err} 为 3.25%,这是由于探测器工作波段相对较窄使得误差较小。

6 结 论

以乘波体为例,分析研究了地基红外探测器对稀薄大气空间高超声速飞行器的探测性能。在计算大气传输作用时,综合考虑了水汽和 CO_2 吸收作用的波段选择性;在计算探测器端的目标辐射照度时,考虑到目标与探测器距离较远,将飞行器视作点目标,且考虑了目标与背景辐射强度的差异以及点目标成像弥散对探测器探测性能的影响,在此基础上计算得到高超声速飞行器的可探测距离。可知,随着目标速度增加,探测系统的作用距离也随之增加,而且探测器在中短波波段对高超声速飞行器的探测能力要强于长波。将驻点区域辐射平衡温度当作点目标温度的近似处理,将会引起一定的误差,此外以 HTV-2 为代表的部分高超声速飞行器,其飞行速度大于 15Ma,飞行器头部激波层内气体温度急剧升高,气体组分将发生分解、电离

等。在研究这类目标的红外探测能力时,需要考虑组分化学反应对飞行器以及流场辐射产生的重要影响,这些都将是下一步研究的重点。

参 考 文 献

- 1 T J McIntyre, R Khan, Troy N Eichmann, *et al.*. Visible and near infrared spectroscopy of Hayabusa reentry using semi-autonomous tracking[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2013, 51(1): 31-38.
- 2 Fuyu Huang, Yongzhong Wang, Xueju Shen, *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.
- 3 Xiao Xizhong, Wang Yueming, Ma Jun, *et al.*. Multispectral measurements of infrared spectral characteristics of an aircraft[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1030002.
肖喜中,王跃明,马 骏,等.飞机红外光谱辐射特性的多光谱测量[J].*光学学报*, 2014, 34(10): 1030002.
- 4 Chang Songtao, Zhang Yaoyu, Sun Zhiyuan, *et al.*. Radiation measurement method for infrared small target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0504001.
常松涛,张尧禹,孙志远,等.红外小目标辐射测量方法[J].*光学学报*, 2014, 34(5): 0504001.
- 5 Huang Xin, Shen Xiangheng, Ye Lu. External factors analysis for influence of low-contrast target capture capability on photoelectric tracker[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0723002.
黄 欣,沈湘衡,叶 露.外部因素对光电跟踪仪低对比度目标捕获能力的影响分析[J].*光学学报*, 2014, 34(7): 0723002.
- 6 Liu Zhaohui, Mu You, She Wenji. Detecting simulation analysis of ground infrared system for ballistic missile in the re-entry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(8): 1472-1476.
刘朝晖,穆 猷,折文集.弹道导弹再入段地面红外探测仿真分析[J].*光子学报*, 2010, 39(8): 1472-1476.
- 7 Zhang Jihua, Yao Dongsheng, Tan Bin. Analysis on effect factors of ground based electro-optic system detection ability on space object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(6): 1178-1182.
张己化,姚东升,谈 斌.地基光电系统空间目标探测影响因素分析[J].*光学学报*, 2008, 28(6): 1178-1182.
- 8 Liu Yingqi, Liu Xiangyi. Research on technology of ground-based infrared radiation feature measurement for space target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0512003.
刘莹奇,刘祥意.空间目标的地基红外辐射特性测量技术研究[J].*光学学报*, 2014, 34(5): 0512003.
- 9 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.
- 10 Ma He, Wu Ping, Zhao Yu. An infrared detection range model based on discrete spectral atmosphere transmittance[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(3): 532-536.
马 鹤,吴 平,赵 煜.一种基于离散光谱透过率的红外探测距离模型研究[J].*应用光学*, 2013, 34(3): 532-536.
- 11 Yu Zhao, Ping Wu, Wenfang Sun. Calculation of infrared system operating distance by spectral bisection method[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 63: 198-203.
- 12 Xiaoqing Chen, Zhongxi Hou, Jianxia Liu, *et al.*. Bluntness impact on performance of waverider[J]. *Computers & Fluids*, 2011, 48(1): 30-43.
- 13 L S Rothman, I E Gordon, Y Babikov, *et al.*. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2013, 130: 4-50.
- 14 Mao Xia, Hu Haiyong, Huang Kang, *et al.*. Calculation method for airplane IR radiation and atmospheric transmittance[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(10): 1228-1232.
毛 峡,胡海勇,黄 康,等.飞机红外辐射及大气透过率计算方法[J].*北京航空航天大学学报*, 2009, 35(10): 1228-1232.
- 15 Mu Da, Han Hongxia. Comparison and analysis for operating range equations of infrared system[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 35(4): 5-9.
牟 达,韩红霞.红外系统作用距离方程的比较与分析[J].*长春理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 35(4): 5-9.
- 16 Xu Shaohua. System Design and Critical Technology Analysis of Hypersonic Gliding Aircraft[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
许少华.高超声速滑翔式飞行器设计与关键技术分析[D].长沙:国防科技大学, 2008.
- 17 Chao Shiyu, Li Guixiang, Li Zhihui, *et al.*. Analysis of distance equation and operating range of infrared system[J]. *Journal of Air Force Radar Academy*, 2011, 25(5): 318-321.
巢时宇,李桂祥,李志淮,等.红外系统距离方程与作用距离分析[J].*空军雷达学院院报*, 2011, 25(5): 318-321.

栏目编辑:刘丰瑞