

基于不同地基红外视距模型的低特征飞行器可探测性分析

张腾¹, 孟夏莹², 高文强¹, 王红丽³, 牛青林^{1*}

¹中北大学机电工程学院, 山西 太原 030051;

²散射辐射全国重点实验室, 上海 201109;

³中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051

摘要 多模式探测成为目标探测识别领域重点发展的技术手段之一,其中视距模型的优选成为指导探测器件设计的重要依据。本文以飞翼布局的低特征飞行器为研究对象,采用计算流体动力学(CFD)方法结合辐射平衡壁面模型预测本体温度,结合MODTRAN大气红外衰减数据库,采用视在光线(LOS)法计算考虑壁面遮挡效应的辐射传输,建立基于噪声等效辐照度(NEFD)、最小可探测温差(MDTD)和最小可分辨温差(MRTD)的地基探测视距模型,计算探测系统对低特征飞行器的最大探测距离和最大探测天顶角。结果表明:低特征飞行器在典型飞行工况下的光谱辐射强度在长波波段(8~12 μm)较中波波段(3~5 μm)辐射积分强度高出2个数量级;NEFD视距模型在长波波段的探测距离高出中波波段近1个数量级,MDTD和MRTD视距模型在中长波波段探测距离基本一致;三种视距模型在长波波段对应的探测能力依次为NEFD>MDTD>MRTD;在中波条件下MDTD视距模型的探测距离最大,对飞行器底部的探测距离约为57 km;MRTD视距模型在观察等级为辨认时无法辨别飞行器具体类型。该研究可为低特征飞行器的探测识别以及探测器的设计提供理论支撑。

关键词 视距模型; 地基探测; 红外辐射; 低特征; 探测距离

中图分类号 TN215

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231763

1 引言

低特征飞行器通过气动结构布局、吸波涂层材料和高温部件降温等手段,主动或被动降低自身与环境的特征信号差异,从而降低被探测系统探测与识别的概率,提高飞行器的战场生存能力^[1]。例如,B-2隐身战略轰炸机作为世界上最为先进的战略轰炸机,通过其极致的一体化飞翼布局 and 特殊吸波材料的使用使得雷达反射面积约为 0.1 m^2 ^[2],为基于雷达的探测识别带来了巨大挑战。

随着红外探测器件灵敏度的提高以及低特征飞行器难以消除的气动加热固有特性,使得飞行器本体热辐射成为重要的辐射源^[3]。辐射信号会经由大气衰减后被红外探测系统接收,并依据光学系统自身的灵敏度对目标和背景的信噪比进行区别从而实现探测目的。因此,基于目标红外辐射特征探测目标成为低特征飞行器最有潜力的探测模式之一。最大探测距离(MDR)作为评价目标可探测性的重要参数,依赖于目标辐射强度和红外探测器的性能指标。对地基红外探

测器而言,探测器在考虑系统本身的辐射噪声的基础上,需要在探测器瞳口处接收来自探测器视场张角内目标、环境、背景的辐射强度,并通过光电转换后加以区分。特别地,当目标距离较远时,目标在探测器阵列面上仅占一个或者几个像素,目标近似为点源。相关研究^[4-5]已经表明,飞行器目标的本征辐射强度强烈依赖于探测角度和探测波段,而本征辐射强度在经大气沿程路径的大气衰减作用下影响探测距离,这意味着,探测距离不仅与目标本身辐射强度有关,还与探测视距模型密切相关。

针对目标可探测性的视距模型主要分为两类:一类是基于面源信息的探测,即通过与环境特征热像和温度的差异实现目标的探测;二类是基于点源辐射强度的探测,即通过感知目标的光谱强度或谱带内积分强度来实现目标探测。代表性的研究有:孙文芳等^[6]基于光谱等分法计算大气透过率,以提高红外系统最小可分辨温差(MRTD)的计算精度;陈晓阳等^[7]基于MRTD对机载双波段共口径光电瞄准光学系统进行设计与性能评估;刘明奇等^[8]利用最小可探测温差

收稿日期: 2023-11-08; 修回日期: 2023-12-22; 录用日期: 2024-01-02; 网络首发日期: 2024-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(52006203, U22B2045)、山西省回国留学人员科研资助项目(2021-113)

通信作者: *niuql@nuc.edu.cn

(MDTD)方法对点目标进行探测距离的预估计算;牛青林等^[9-10]采用噪声等效辐照度(NEFD)方法对高速滑翔类点目标进行可探测性分析;谢家豪等^[11]提出基于弥散系数的NEFD探测距离模型,对无人机集群的可探测性进行分析;王卫杰等^[12]构建了综合多种因素的空基红外系统点目标作用距离模型,对不同类型目标的红外隐身性能进行了分析;Liu等^[13]通过选择最佳光谱波段,以提高探测系统的基本性能以及增加对目标的探测距离;Ren等^[14]利用基于对比度的点目标作用距离模型,提出一种新的计算系统作用距离的方法;Zhou等^[15]以F-22为例,阐述了天基红外探测系统在地球背景下飞机目标的探测数学模型。

目前,多数研究侧重采用单一视距模型对目标可探测性进行分析,在同一探测器参数下对多种视距模型进行统一的目标探测距离计算的研究比较少见。特别是对于低特征飞行器而言,低的特征信号为探测系统探测识别任务带来较大挑战。从公开的文献报道来看,基于红外辐射特性评估目标可探测性的研究较多,但不同种视距模型下的目标可探测能力和对照研究尚不充分。因此,亟须通过相关计算为低特征飞行器探测、识别以及探测器的研究提供理论支持。

本文围绕低特征飞行器的探测与识别需求,构建基于NEFD、MDTD和MRTD的三种地基红外视距模型,在采用计算流体动力学(CFD)方法计算飞行器壁面温度和视在光线(LOS)方法计算本体红外辐射强度的基础上,分别采用不同探测视距模型预测地基红外探测系统对低特征飞行器的探测距离,旨在为低特征飞行器的探测识别及探测系统的设计提供参考。

2 计算模型

2.1 壁面温度计算模型

飞行器高速飞行时会与周围空气相互作用使得其扰流场内空气温度急剧升高,对于飞行器外部绕流,可用三维Navier-Stokes方程表征,基本形式为

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z} = \frac{\partial \mathbf{E}_v}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_v}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}_v}{\partial z} + \mathbf{S}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{Q} 为守恒向量变量; t 为时间; \mathbf{E} 、 \mathbf{F} 和 \mathbf{G} 分别为 x 轴、 y 轴和 z 轴方向的无黏通量向量; \mathbf{E}_v 、 \mathbf{F}_v 和 \mathbf{G}_v 分别为 x 轴、 y 轴和 z 轴方向的黏性通量向量; \mathbf{S} 为化学反应源项向量。

高温流场会在飞行器表面形成热流,使得飞行器壁面温度升高产生热辐射,在忽略辐射加热情况下,壁面热流的计算表达式为

$$Q_w = \tau \frac{\partial T}{\partial m} + \rho_g \sum_{s=1}^N h_s D_s \frac{\partial c_s}{\partial m}, \quad (2)$$

式中: Q_w 表示壁面热流; τ 为热传导系数; T 为温度; m

为飞行器表面局部法相距离; N 为化学组分种类数量; ρ_g 为气体密度; h_s 和 D_s 分别为第 s 种组分的焓值和扩散系数; c_s 为第 s 种组分的质量分数。

假设飞行器壁面符合薄壁近似,在辐射壁面平衡边界条件下,壁面温度的表达式为

$$T_w = \left(\frac{Q_w}{\sigma \epsilon} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (3)$$

式中: T_w 为壁面温度; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ϵ 为材料表面发射率。

2.2 点源辐射计算模型

假设飞行器的壁面发射率均一、不随温度与波长发生变化,且飞行器蒙皮均为漫反射壁面,则由飞行器表面温度结合普朗克黑体定律^[16],可得飞行器本体温度为 T_i 的微元面在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内的辐射出射度为

$$M_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_i(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp[c_2/(\lambda T_i)] - 1} d\lambda, \quad (4)$$

式中: M_i 为第 i 个微元面的黑体辐射出射度; $M_i(\lambda)$ 为第 i 个微元面的黑体光谱辐射出射度;第一辐射常数 $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$;第二辐射常数 $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

在忽略飞行器本体之间光辐射反射作用下,在不同探测角度下,考虑到飞行器自身存在遮挡效应,可以获得飞行器在探测方向上来自可见面积上的辐射强度为

$$I = \sum_{i=1}^n \epsilon \cdot M_i \cdot A_i / \pi, \quad (5)$$

式中: I 为点源辐射强度; n 为微元面的个数; ϵ 为飞行器表面材料发射率; A_i 为第 i 个微元面在探测方向上的可见面积。

2.3 壁面平均温度计算模型

在MDTD和MRTD红外视距计算模型中,为了区分目标与环境间的温度差异,将真实目标看作是温度分布均匀的理想模型,且模型面积等于目标在探测方向的投影面积。为兼顾真实目标温度不均匀分布对理想模型平均温度计算的影响,利用目标微元温度在其可见面积上的加权平均获得对于理想模型的平均温度,则目标平均温度 T_A 为

$$T_A = \sum A_i T_i / A, \quad (6)$$

式中: A_i 为目标第 i 个微元的可见面积; T_i 为第 i 个微元温度; A 为在探测方向上目标总的可见面积。

3 红外视距计算模型

3.1 基于NEFD的视距模型

当目标距离红外探测系统很远时,目标在探测器焦平面上所成的像很小,以致目标的张角小于或等于红外探测器的瞬时视场,这时可将目标看作点目标^[17]。从能量的角度出发,对于点源目标而言,只要目标的红外辐射信号能量足够大,即信噪比大于

探测器灵敏度,认为目标可被探测到。目标在红外系统上的辐照度是红外系统入瞳总的辐照度 E 与背景全部充满探测器单元时探测系统上的辐照度 E_1 之差,即

$$\Delta E = E - E_1 = \left(\frac{I_t}{R^2} - L_b \omega_t \right) \tau_a(R) = \frac{I_t - L_b A_t}{R^2} \tau_a(R), \quad (7)$$

式中: I_t 为目标的辐射强度; L_b 为背景的辐射强度; ω_t 为目标对光学系统中心所张立体角; $\tau_a(R)$ 为大气透过率; R 为目标到探测器的距离; A_t 为飞行器目标的可见面积。

目标在红外探测系统的辐照度差 ΔE 与系统 N_{EFD} 的比为信噪比,即

$$S_{\text{NR}} = \frac{\Delta E}{N_{\text{EFD}}}. \quad (8)$$

将式(7)中的 ΔE 代入式(8)即可获得作用距离 R 的表达式为

$$R = \left[\frac{(I_t - L_b A_t) \tau_a(R)}{N_{\text{EFD}} \cdot S_{\text{NR}}} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

3.2 基于 MDTD 的视距模型

MDTD 方法也是对点源目标进行视距估算的一种方法,其基本思想为:对于空间张角角频率为 f 的点目标,其与背景的实际等效温差 ΔT_e 在经过大气衰减到达热成像系统时,仍有大于或等于红外探测系统对应该频率的最小可探测温差 $M_{\text{DTD}}(f)$,有如下表达式:

$$M_{\text{DTD}}(f) = \sqrt{2} S_{\text{NRDT}} \left[\frac{N_{\text{ETD}}}{I(x, y)} \right] \left[\frac{f \beta Q(f)}{T_e F \Delta f_R} \right], \quad (10)$$

式中: S_{NRDT} 为探测器阈值显示信噪比; N_{ETD} 为系统的噪声等效温差; $I(x, y)$ 为图像亮度最大值的相对值,相当于系统的传递函数; $Q(f)$ 为噪声滤波函数; f 为空间频率(c/mrad); T_e 为人眼的积分时间(s),一般取 0.2 s ; F 为帧频(Hz); Δf_R 为基准视频带宽; β 为竖直方向视场。

基于 MDTD 的视距模型原理,可知红外探测器能够观测到目标的基本条件为

$$\Delta T = \Delta T_e \tau_a(R) \geq M_{\text{DTD}}(f), \quad (11)$$

式中: ΔT 为经过大气衰减后目标与背景间的温差; ΔT_e 为目标与背景之间的实际温差;频率 f 由下式确定:

$$\frac{H}{R} = \theta = \frac{1}{2f}, \quad (12)$$

式中: H 为目标几何高度; θ 为系统的空间分辨角。

3.3 基于 MRTD 的视距模型

当飞行器的角尺寸超过系统的瞬时视场时,飞行器成为扩展源目标,热成像系统最典型的特征为“成

像”,意味着图像细节的保持是基本要求之一。因此,对于热成像系统而言,不仅要考虑目标能量大小,还应考虑目标的几何尺寸和形状以及要求的观察等级等因素。目前,工程应用中较为公认的方法是利用表征系统综合静态性能的 MRTD 视距模型^[18],其计算形式为

$$M_{\text{RTD}}(f) = \frac{\pi^2}{4\sqrt{14}} S_{\text{NRDT}} f \frac{N_{\text{ETD}}}{M_{\text{TF}}(f)} \left[\frac{(\alpha/\tau_a)\beta}{T_e F \Delta f_R} \right]^{1/2}, \quad (13)$$

式中: $M_{\text{TF}}(f)$ 为系统的传递函数; α 为水平方向的视场。

此时,人眼能够通过红外探测系统观测到目标的基本条件为

$$\Delta T = \Delta T_e \tau_a(R) \geq M_{\text{RTD}}(f), \quad (14)$$

$$\frac{H}{n_e R} \geq \Delta \theta = \frac{1}{2f}, \quad (15)$$

式中, n_e 为不同观测等级要求时的目标等效条带数(半周期数)。

由于上述 MRTD 公式为实验室测量的计算公式,对于实际目标的计算要对公式进行修正。对于一般飞行器目标而言,主要是对目标形状以及阈值信噪比的修正,其最终计算公式为

$$M_{\text{RTD}e} = M_{\text{RTD}}(f) \cdot \sqrt{\frac{7}{\epsilon_e}} \cdot k, \quad (16)$$

式中: ϵ_e 为不同探测概率下 Johnson 准则的半周期数与目标高宽比的乘积; k 为不同探测概率下对阈值信噪比的修正。

3.4 大气对目标红外辐射衰减计算

大气作为红外辐射传输的介质,其自身对红外辐射有着吸收和散射作用,会对飞行器目标红外辐射造成一定的衰减,进而对目标最大探测距离的计算产生较大影响。大气传输中大气光谱透过率 $\tau_a(\lambda)$ 和衰减系数 $\mu(\lambda)$ 之间的关系可由 Bouguer-Lambert 定律表示:

$$\tau_a(\lambda) = \varphi_e(\lambda, R) / \varphi_e(\lambda, 0) = e^{-[\mu(\lambda)R]}, \quad (17)$$

式中: R 为红外探测系统与目标之间的距离; $\varphi_e(\lambda, R)$ 为距离 R 处目标或背景辐射通量光谱密度; $\varphi_e(\lambda, 0)$ 为 $R=0$ 时 $\varphi_e(\lambda, R)$ 的特例; λ 为波长。

在不考虑特殊气象条件下,大气对红外辐射的衰减主要包括 CO_2 和 H_2O 的吸收作用以及大气中一些悬浮颗粒的散射作用。因此,大气衰减的总透过率由下式计算:

$$\tau_a(\lambda) = \tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{CO}_2}(\lambda) \cdot \tau_s, \quad (18)$$

式中: $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ 为 H_2O 吸收透过率; $\tau_{\text{CO}_2}(\lambda)$ 为 CO_2 吸收透过率; τ_s 为散射透过率。

由于大气传输专业软件 MODTRAN^[19]在计算大气相关参数方面方便准确,因此本文大气衰减的总透过率的计算通过 MODTRAN 来实现。

4 验证

4.1 MRTD 视距模型的验证

MRTD 视距模型在不考虑修正的情况下是关于频率 f 的函数,利用文献[6]中空间频率与 MRTD 间的关系验证建立的 MRTD 视距计算模型的正确性。在文献[6]中,光学扫描系统的通光孔径为 125 mm;帧频为 25 frame/s;水平视场和垂直视场分别为 0.15708 rad 和 0.11781 rad;在 50% 的探测概率、人眼视觉系统的阈值信噪比为 2.8 的情况下,对空间频率与 MRTD 的关系进行计算。以文献数据为基本条件,计算结果 (Cal.) 与文献[6]中的数据 (Ref.) 对照见图 1,可以看出,二者的空间频率与 MRTD 的关系的对比结果基本吻合,验证了本文 MRTD 计算模型和编制程序的可靠性。

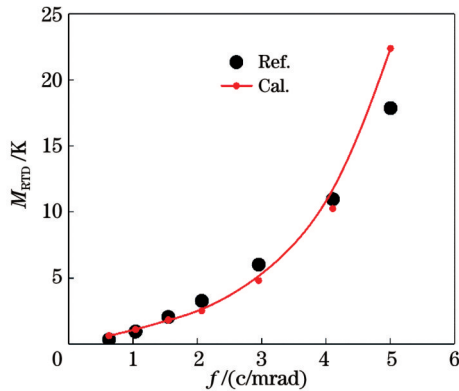


图 1 空间频率与最小可辨温差关系的对比结果

Fig. 1 Comparison results of relationship between spatial frequency and minimum resolvable temperature difference

4.2 MDTD 视距模型的验证

利用文献[8]中针对 7.62 mm 子弹的 MDTD 视距结果验证本文建立的 MDTD 视距模型的准确性。在文献[8]中,子弹表面温度分别取 500、600、700 K,环境温度为 300 K,FLIR-T425 型热像仪参数分别为: $N_{\text{ETD}} < 0.05$ K;通光孔径为 12.5 mm;帧频为 50 Hz;信噪比 (S_{NR}) 为 10,选用海拔为 0.0313 km 的大气条件计算子弹在不同表面温度下的最大探测距离。以文献数据为基本条件,利用本文的 MDTD 模型进行计算。表 1 为本文探测距离计算值与文献[8]结果的对比,其

表 1 MDTD 视距模型计算结果对比

Table 1 Comparison of calculation results of MDTD visual range prediction model

Bullet surface temperature /K	500	600	700
Distance (Ref.) /km	4.83	5.82	6.29
Distance (Cal.) /km	4.89	5.24	5.45
Error /%	1.24	9.97	13.35

中子弹温度在 200 K 低温差和 400 K 高温差工况下的最大误差分别为 1.24% 和 13.35%,精度误差随温差增大呈现升高趋势,其原因为:在大温差下空间频率 f 对 MDTD 值较敏感,从而导致探测距离偏离,误差增大。由于本文飞翼布局飞行器为小温差目标,因此可以推测 MDTD 数据模型的计算误差满足计算要求。

5 计算条件

5.1 网格与边界条件

本文飞翼布局飞行器模型参考文献[20],对飞行器三维参数进行几何建模。由于模型的对称性,为降低计算量选取 1/2 计算域进行结构化网格划分。在临近壁面区域以及激波层可能出现的区域进行网格加密处理,网格划分共采用 76 个 block 块,网格数目约为 530 万。在图 2(a)~(c) 中分别给出了流体域网格、表面网格以及固体域网格分布。

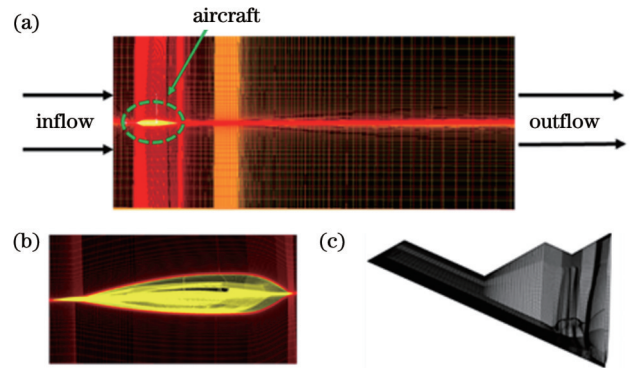


图 2 计算域与网格

Fig. 2 Computational domain and grid

本文研究的低特征飞行器为飞翼布局隐身飞行器,飞行工况可参考文献[21],以飞行高度 $H=12$ km、飞行马赫数 $M=0.8$ 为典型工况进行计算分析。考虑到飞行器低可侦测性设计以及发动机关机巡航或极低尾焰辐射特征的极端情况,本文仅关注本体可探测性,以获得尽可能保守的探测距离。鉴于上述考量,计算域的边界条件包含 5 类,分别为与自由流相同流量参数的来流入口边界、与来流入口共流的远场边界、超音速出口边界、1/2 模型对称面处施加对称边界和辐射平衡壁面假设的无滑移壁面边界条件。其中,来流温度、压力和密度分别取 $T_{\infty}=216.65$ K、 $p_{\infty}=19399.4$ Pa 和 $\rho_{\infty}=0.312$ kg/m³,壁面发射率选取 $\epsilon=0.8$ 。

5.2 地基探测条件

地基红外探测系统对飞行器的观测示意如图 3 所示,考虑到地球曲率的影响,探测范围集中在立体角为 2π 的空间视场内。由于视场内任意切面具有一致性,本文选取图 3 中所示的小三角包围的切面进行研究。其中, H 为目标飞行高度,固定为 12 km; α 为探测天顶

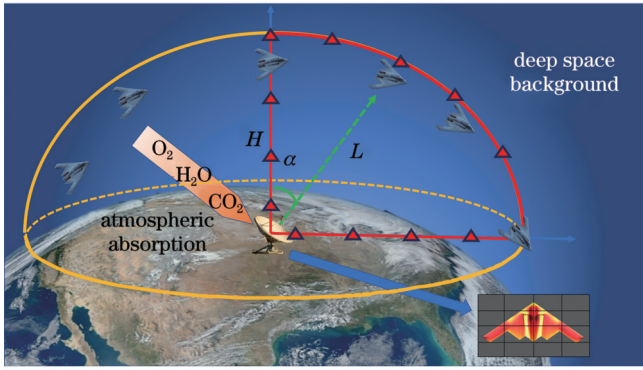


图 3 地基红外探测系统观测示意图

Fig. 3 Observation schematic diagram of ground-based infrared detection system

角,是探测器垂线方向与目标和探测器连线方向的夹角; L 是目标到探测器的直线距离。

飞行器由于姿态的调整以及轨迹的变化会将不同的机身部位暴露在探测器视场内,为探究探测器不同探测角度下目标红外信号的变化,选取两个典型探测面进行分析,即通过改变探测面内的探测角度来计量机身不同部位辐射强度被探测器接收到的强度。探测示意图如图 4 所示,其中 θ 为探测面 1 (YOZ 面) 内的探测角, β 为探测面 2 (XOY 面) 内的探测角。

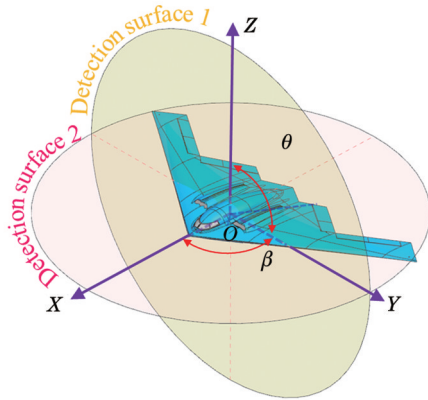


图 4 飞行器典型探测面示意图^[22]

Fig. 4 Schematic diagram of representative detection surface of aircraft^[22]

为了在统一探测参数下对视距模型进行对照,以扫描型红外热像系统 Catherine-GP^[23]作为地基红外探测系统的性能参数(见表 2)来计算 NEFD、MDTD 和 MRTD 不同视距计算模型的探测能力。

针对视距模型计算所需要的探测阈值信噪比,本文选用实验常用的 $S_{NR}=2.8$ ^[6]。针对探测器灵敏度,参考文献[24]给出的灵敏度计算公式,由表 2 中的参数计算获得该红外热像系统的灵敏度为 $N_{EFD}=6.0 \times 10^{-12}$;由于 NEFD 和 MRTD 是关于点源的视距模型,为统一比较, MRTD 模型选用的观察等级为“发现”,其在不

表 2 Catherine-GP 性能参数^[23]

Table 2 Performance parameter of Catherine-GP^[23]

Parameter	Parameter value
Clear aperture (mm)	125.00
NETD (mK)	80
Average transmittance	0.80
Frame rate (f/sec)	25.00
Horizontal field of view wide/narrow (rad)	0.15708/0.0524
Vertical field of view wide/narrow (rad)	0.11781/0.0393
Detection element length (μm)	28
Detection element width (μm)	25
Detecting Element Numbers	228 \times 4
Peak value D^* ($\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$)	2.3 $\times 10^{11}$

同观察等级下对应的半周期 n_e 如表 3 所示。

表 3 不同观察等级对应的半周期数 n_e

Table 3 Number of half cycles (n_e) corresponding to different observation levels

Observation level	Discovery	Classify	Recognition	Identify
n_e	2.0	2.8	8.0	12.8

5.3 大气传输模型

MODTRAN 大气辐射模拟计算软件通过在给定辐射传输^[25]驱动、气溶胶与云参数、探测器与光源的相对位置以及地面相关光谱信息的基础上,根据辐射传输方程计算大气的透过率以及辐射亮度。考虑到大气辐射传输模型的计算精度、效率和适用性,本文选取 MODTRAN 软件中的 1976 年美国标准大气模型作为大气传输模型,选择倾斜传输路径、海军海洋气溶胶模型、探测器高度、观测天顶角以及探测器与目标之间的距离来模拟计算地基红外探测系统在不同探测天顶角下与目标飞行器之间不同波段内的大气透过率。图 5 中给出了当探测天顶角 $\alpha=0^\circ$ 时探测范围从 0~30 km 间的大气透过率的计算结果,其中 MWIR 表示的区域为中波波段, LWIR 表示的区域为长波波段。

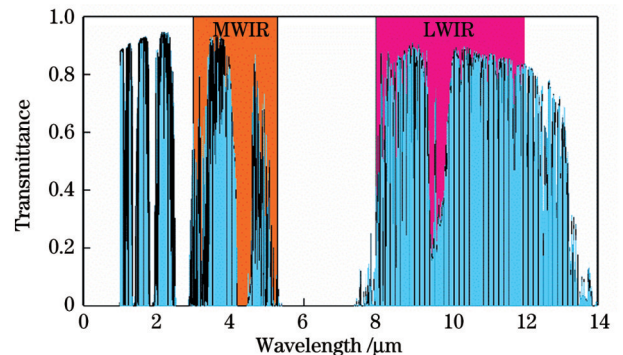


图 5 大气透过率示意图

Fig. 5 Schematic diagram of atmospheric transmittance

6 结果与分析

6.1 飞行器流场参数

飞行器壁面温度的高低与分布强烈依赖于其周围绕流场,考虑地基探测的条件以及飞行器的正常飞行姿态,飞行器下腹部是最容易被探测到的,为探究飞行器腹部温度与周围流场的关系,图 6 给出了低特征飞行器腹部绕流场云图,其中图 6(a)、6(b)、6(c)分别为绕流场的压力、马赫数、温度云图。从图中可以看出,当来流高速流过飞行器腹部时,流场特性参数会产生较大的变化,压力和温度会变低,马赫数会增大,这是因为飞行器在结构上从头部到腹部会有一个弧形的凸起过渡,当气流经过该结构时,气流速度会进一步加快,压力变低,加剧了对流换热的结果,使得壁面温度偏低。飞行器腹部靠近头部的的位置温度偏高,主要是因为尖锐化头部与空气的接触面积较小,会形成较大驻点热流。

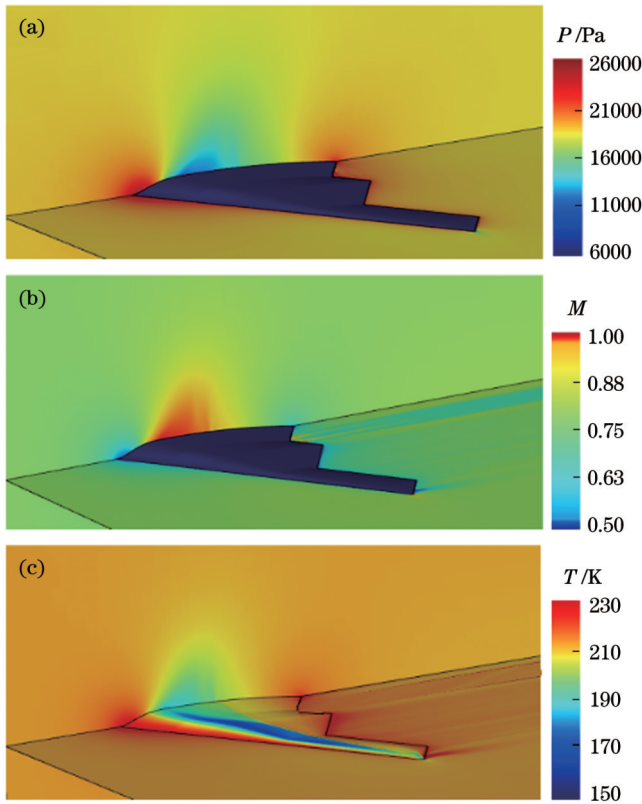


图 6 飞行器流场云图。(a)流场压力;(b)流场马赫数;(c)流场温度

Fig. 6 Contours of aircraft flow field. (a) Pressure of flow field; (b) Mach number of flow field; (c) temperature of flow field

6.2 红外辐射强度分布

红外辐射强度是红外探测器直接响应的物理量。由于飞行器壁面温度分布得不均匀,飞行器不同部位辐射强度存在明显差异。图 7 和图 8 分别给出了探测面 1 和探测面 2 内不同探测角度下 2~14 μm 波段内的

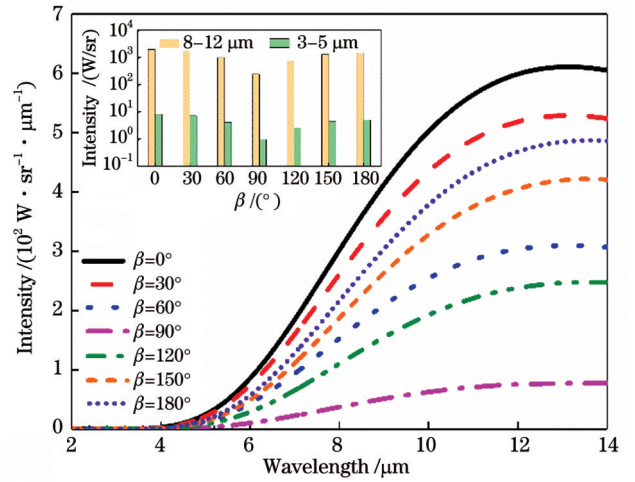


图 7 探测面 1 内不同观测角度下的辐射强度

Fig. 7 Radiation intensities at different observation angles within detection surface 1

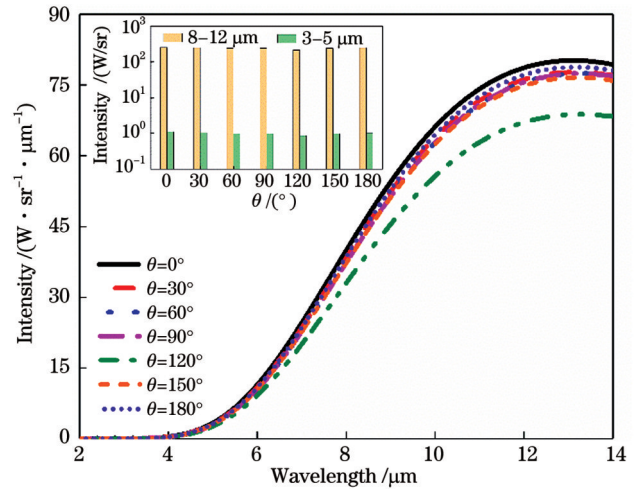


图 8 探测面 2 内不同观测角度下的辐射强度

Fig. 8 Radiation intensities at different observation angles within detection surface 2

光谱辐射强度,其中左上方插图为不同探测角下 3~5 μm 和 8~12 μm ^[26] 谱带内积分强度的分布。从两个图中可以看出,飞行器壁面光谱辐射强度随着波长的变长逐渐增高,在 12 μm 附近达到峰值,而在 2~5 μm 波段内的辐射强度较其他波段近似为极小量。从谱带内积分强度沿探测角度的分布可以看出,飞行器在长波波段内的积分强度要比中波波段高出约两个数量级。

从图 7 中可以看出,探测面 1 内的辐射强度在不同探测角下差异明显,由于地基探测系统在常规情况下无法探测到飞行器顶部,此时飞行器的腹部辐射强度最大,要比辐射强度最低的下侧部高出 10 倍左右。从图 8 中可以看出,探测面 2 内的辐射强度在不同探测角下基本一致,最低辐射强度出现在后侧观测工况下,这主要是飞行器侧面的可视面积较

小的缘故。

6.3 不同视距模型下飞行器的最大探测距离

最大探测距离是衡量红外探测系统性能的重要指标,不同视距模型的选择会从根本上影响探测器对目标最大探测距离的预估。为探究不同视距模型对飞行器最大探测距离的影响,图 9 和图 10 分别给出了探测面 1 内三种视距模型在长波和中波波段内对飞行器的最大探测距离。同理,图 11 和图 12 给出了探测面 2 内相对应的最大探测距离。图 9~12 中最大探测距离随探测角度的分布结果都是基于地基探测系统探测天顶角为 0° 的工况下得出的。从图中可以看出,三种视距模型在长波波段的最大探测距离都高于中波波段,其

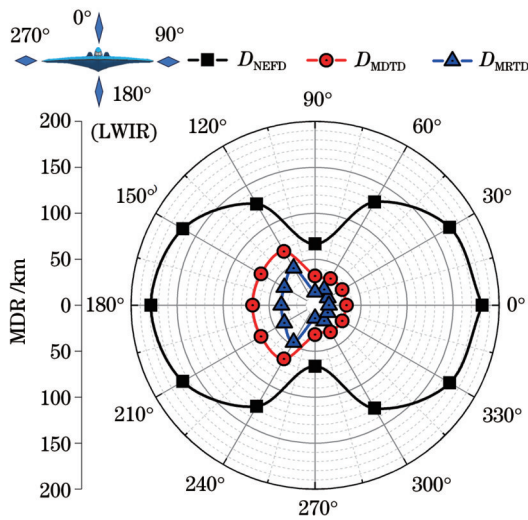


图 9 探测面 1 长波波段的最大探测距离
Fig. 9 Maximum detection range in long wave band of detection surface 1

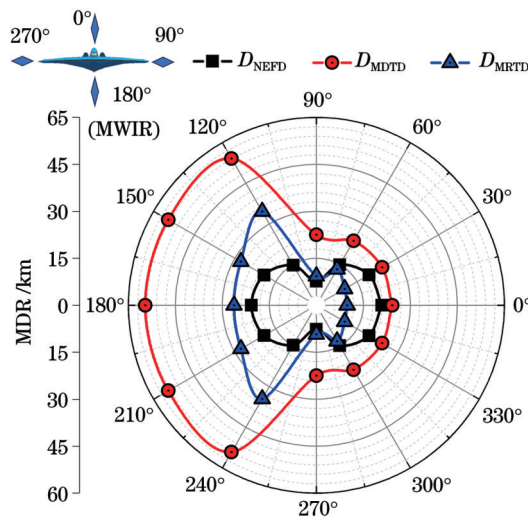


图 10 探测面 1 中波波段的最大探测距离
Fig. 10 Maximum detection range in medium wave band of detection surface 1

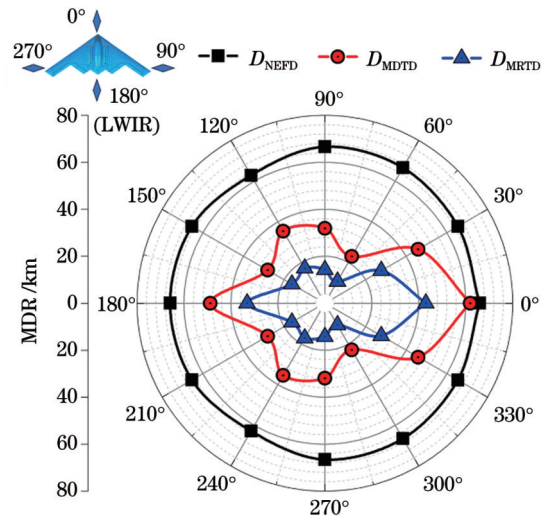


图 11 探测面 2 长波波段的最大探测距离
Fig. 11 Maximum detection range in long wave band of detection surface 2

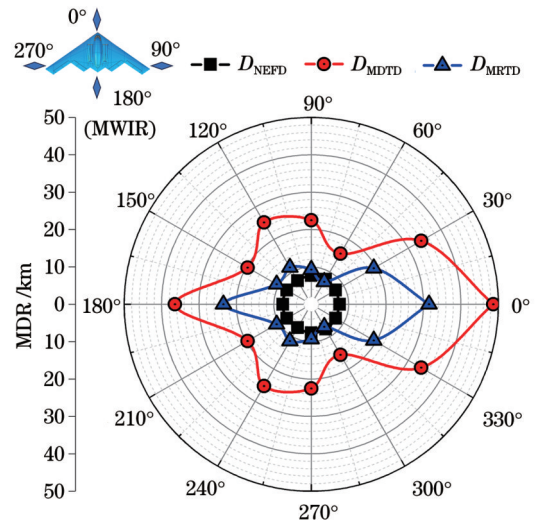


图 12 探测面 2 中波波段的最大探测距离
Fig. 12 Maximum detection range in medium wave band of detection surface 2

中基于 NEFD 视距模型的探测距离的差异最为显著,可相差近一个数量级;基于 MDTD 和 MRTD 视距模型在中长波波段内的探测距离基本一致。上述差异主要归因于 NEFD 视距模型依靠目标的红外光谱辐射强度,而目标的光谱辐射强度具有明显的波段选择性,这一点可以从图 7 和图 8 中的结果看出;NEFD 视距模型在长波波段的探测距离要大于另外两种视距模型,而在中波波段内,MDTD 视距模型的探测距离最大。

从图 9 和图 10 中可以看出,在探测面 1 内,NEFD 视距模型对飞行器的探测距离以飞行器侧面呈对称分布,对飞行器背部与腹部的探测距离最大;而 MDTD 和 MRTD 视距模型对飞行器腹部的探测

距离是背部的 3 倍左右;从图 11 和图 12 中可以看出,在探测面 2 内,NEFD 视距模型在各个视角下的最大探测距离相差很小,这可以从图 8 中探测面 2 的辐射强度比较中看出,而 MDTD 和 MRTD 视距模型的最大探测距离的分布比较复杂,对飞行器的迎头探测距离最大,对飞行器斜侧方的探测距离最小,这主要是飞行器不同部位的平均温度不同,MRTD 视距模型与不同视角下飞行器可见面积变化密切关联的缘故。

6.4 地基探测下不同视距模型的最大观测能力

目标发出的红外信号经过大气衰减到达红外探测器,当信号衰减到一定程度时,探测系统将无法分辨目标红外信号。为研究地基红外探测系统在不同视距模型下对飞行器的最大探测能力(包括最大探测距离和最大探测天顶角),以飞行器腹部朝向探测器为探测方向,在不同探测天顶角 α (见图 3)下计算三种视距模型对应的最大探测距离,并将其与飞行器和探测器之间的实际距离 L 进行比较,包络出三种视距模型对飞行器的最大探测天顶角,如图 13 所示。从图中可以看出,三种视距模型在探测天顶角为 $0\sim 45^\circ$ 的范围内最大探测距离基本上保持不变,这种现象主要是由于低层稠密大气对红外信号的衰减起着主要作用,而高层稀薄大气对红外信号的衰减影响较小,在 $0\sim 45^\circ$ 的探测天顶角范围内,目标本征辐射透过稠密大气的沿程距离相差不大,故对探测距离影响微弱。随着探测天顶角增大,目标本征辐射透过稠密大气较稀薄大气的沿程距离占比增大,大气衰减效应显著。三种视距模型的可探测能力由大到小依次为 $NEFD > MDTD > MRTD$ 。其中,NEFD 视距模型下飞行器的探测距离最大,最大探测天顶角 $\alpha_{max} = 83^\circ$,而 MDTD 视距模型的最大探测天顶角 $\alpha_{max} = 78^\circ$,由于地球曲率的影响,MDTD 视距模型最大探测距离只有 NEFD 视距模型的 1/2。在 MRTD 视距模型下,探测天顶角比 MDTD 视距模型

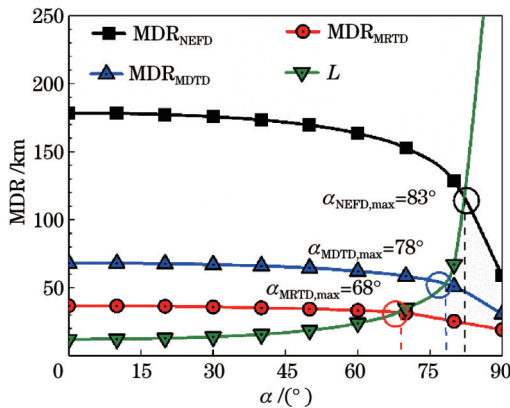


图 13 地基红外系统的最大观测范围

Fig. 13 Maximum observation range of ground-based infrared system

降低了 10° ,且在最大探测距离上仅有 MDTD 方法的 3/5 左右。

值得注意的是,MRTD 视距模型与观察等级密切相关。为了分析观察等级与探测距离的关系,在图 14 中给出了观察等级分别为发现、分类、识别和辨认条件下飞行器的最大探测距离及最大探测天顶角。从图中可以看出,随着观察等级的提高,MRTD 视距模型对目标的最大探测距离与探测天顶角在减小,但是从发现等级到分类等级,最大探测天顶角变化不大;若观察等级为识别等级,那么 MRTD 视距模型的最大探测距离将会发生大范围的减小,最大探测天顶角仅为 36.5° ,最大探测距离仅有 15 km 左右。在辨认等级下,最大探测距离与飞行器和探测器间的距离 L 没有交集,这意味着该类型的红外探测器无法确认目标飞行器的具体型号。

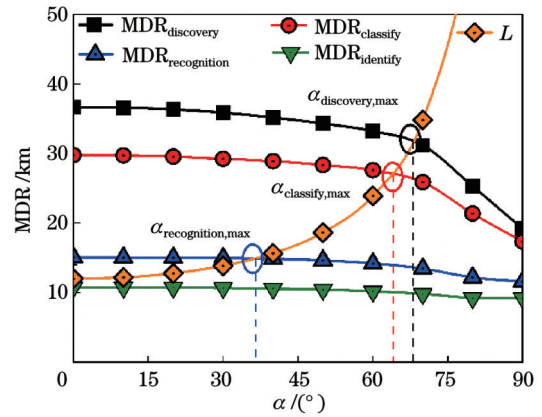


图 14 MRTD 视距模型在不同观测等级下的最大观测范围
Fig. 14 Maximum observation range of MRTD visual range prediction model at different observation levels

7 结 论

本文针对低特征飞行器的探测与识别需求,通过建立飞翼布局的低特征飞行器模型,构建 NEFD、MDTD 和 MRTD 三种红外视距模型,结合大气衰减参数,从点源和面源的角度实现对三种视距模型的统一计算,数值分析了飞翼布局低特征飞行器在三种红外视距模型下的地基可探测性,结果表明:

- 1) 飞翼布局飞行器在典型工况下的长波波段 ($8\sim 12\ \mu\text{m}$) 谱带内积分强度要比中波波段 ($3\sim 5\ \mu\text{m}$) 高出两个数量级,仰视观测角度下飞行器红外辐射强度较侧视观测高出近一个数量级,辐射强度呈现出强烈的谱带和探测角度选择性。
- 2) NEFD 视距模型在长波波段的探测距离要比中波波段高出近一个数量级,而 MDTD 和 MRTD 视距模型在中长波波段的探测距离基本一致;在长波波段,三种视距模型的探测距离由大到小为 $NEFD > MDTD > MRTD$ 。
- 3) 在含俯仰角度的探测面内,NEFD 视距模型

对飞行器背部与腹部的探测距离最大约为 170 km, 而 MDTD 和 MRTD 视距模型对飞行器腹部的探测距离最大, 分别为 57 km 和 38 km; 在侧环视观测面内, 三种视距模型均对低特征飞行器头部的探测距离最大, 其中 NEFD 视距模型的最大探测距离约为 62 km。

4) MRTD 视距模型在发现、分类和识别观察等级下均可实现对飞行器的探测, 而在辨认等级下将无法实现对目标的探测。

为提高视距模型的计算精度和适用性, 后续须开展 MRTD 和 MDTD 真实气象条件视距模型和大温差修正方法的研究。

参 考 文 献

- [1] 贺媛媛, 周超. 飞行器隐身技术研究及发展[J]. 飞航导弹, 2012(1): 84-91.
He Y Y, Zhou C. Research and development of aircraft stealth technology[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2012(1): 84-91.
- [2] 薛晓春, 王雪华. 隐身与反隐身技术的发展研究[J]. 现代防御技术, 2004, 32(2): 60-65.
Xue X C, Wang X H. The development study of stealth and antistealth[J]. Modern Defense Technology, 2004, 32(2): 60-65.
- [3] 石安华, 李海燕, 石卫波, 等. 临近空间高超声速巡航飞行器红外特征[J]. 兵工学报, 2022, 43(4): 796-803.
Shi A H, Li H Y, Shi W B, et al. Infrared radiation feature of near space hypersonic cruise vehicle[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(4): 796-803.
- [4] Niu Q L, Meng X Y, He Z H, et al. Infrared optical observability of an earth entry orbital test vehicle using ground-based remote sensors[J]. Remote Sensing, 2019, 11(20): 2404.
- [5] Chen Y T, Zheng H R, Ren X, et al. Backward Monte Carlo method for simulating spectral radiation characteristics of boost-gliding vehicle[J]. Aerospace Science and Technology, 2023, 132: 108087.
- [6] 孙文芳, 吴平, 张立帅. 基于光谱等分法估算复杂大气条件下红外成像系统的 MRTD 和作用距离[J]. 红外, 2015, 36(1): 25.
Sun W F, Wu P, Zhang L S. Estimation of MRTD and operating distance of infrared imaging system under complex atmospheric condition based on spectral bisection method[J]. Infrared, 2015, 36(1): 25.
- [7] 陈晓阳, 高明. 机载双波段共口径光电瞄准光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(5): 20200322.
Chen X Y, Gao M. Design of airborne dual-band common aperture photoelectric aiming optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(5): 20200322.
- [8] 刘明奇, 王思远, 何玉青, 等. 采用多种红外视距模型的子弹辐射探测系统作用距离分析[J]. 中国光学, 2015, 8(4): 636.
Liu M Q, Wang S Y, He Y Q, et al. Bullet radiation detection range analysis based on multiple infrared visual range prediction models[J]. Chinese Optics, 2015, 8(4): 636.
- [9] 牛青林, 杨霄, 陈彪, 等. 高速滑翔目标点源红外辐射特征模拟及可探测性分析[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11): 1104001.
Niu Q L, Yang X, Chen B, et al. Infrared radiation characteristics and detectability analysis of point source based on high-speed sliding[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(11): 1104001.
- [10] 杨霄, 牛青林, 贺志宏, 等. 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[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1204001.
Yang X, Niu Q L, He Z H, et al. Analysis of infrared radiation characteristics and detectability of HTV-2-like hypersonic gliding aircrafts[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1204001.
- [11] 谢家豪, 黄树彩, 韦道知, 等. 空天红外探测系统对无人机集群探测能力分析[J]. 光学学报, 2022, 42(18): 1812002.
Xie J H, Huang S C, Wei D Z, et al. Detectability analysis of air-space infrared detection system for UAV swarm[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(18): 1812002.
- [12] 王卫杰, 黄俭, 袁光福, 等. 空基红外系统作用距离建模及应用分析[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1295-1302.
Wang W J, Huang J, Yuan G F, et al. Modeling and application analysis of operating range of air-based infrared system[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(6): 1295-1302.
- [13] Liu F, Shao X P, Han P L, et al. Detection of infrared stealth aircraft through their multispectral signatures[J]. Optical Engineering, 2014, 53(9): 094101.
- [14] Ren K, Tian J, Gu G H, et al. Operating distance calculation of ground-based and air-based infrared system based on Lowtran7[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 77: 414-420.
- [15] Zhou X X, Ni X Y, Zhang J W, et al. A novel detection performance modular evaluation metric of space-based infrared system[J]. Optical and Quantum Electronics, 2022, 54(5): 274.
- [16] 谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算: 计算热辐射学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
Tan H P, Xia X L, Liu L H, et al. Numerical calculation of infrared radiation characteristics and transmission: computational thermal radiology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006.
- [17] 唐玉俊, 周晓萱, 倪歆玥, 等. 红外探测灵敏度自适应优化方法研究[J]. 中国激光, 2022, 49(21): 2110001.
Tang Y J, Zhou X X, Ni X Y, et al. Research on adaptive optimization method for infrared detection sensitivity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(21): 2110001.
- [18] 张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
Zhang J X, Li Y D, Jin W Q. Low light level and infrared imaging technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995.
- [19] 李宝莹, 崔生成, 乔智, 等. 一种估测气溶胶吸收系数垂直分布的理论方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1901001.
Li B Y, Cui S C, Qiao Z, et al. Theoretical method to estimate vertical distribution of aerosol absorption coefficient[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1901001.
- [20] 陈运剑. B-2 飞翼布局轰炸机三维复原及特性分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
Chen Y J. Three-dimensional reconstruction and characteristic analysis of B-2 flying wing bomber[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [21] 温羨娟. 浅谈“B-2”隐身战略轰炸机[J]. 现代防御技术, 2001, 29(4): 1-4.
Wen X Q. Discussion on generalities of “B-2” stealth strategic bomber[J]. Modern Defence Technology, 2001, 29(4): 1-4.
- [22] 吕蓉, 牛青林, 董士奎. 类 B-2 型飞行器红外辐射特性数值模拟[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(7): 20220810.
Lü R, Niu Q L, Dong S K. Numerical simulation of infrared radiation characteristics of the B-2-like aircraft[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(7): 20220810.
- [23] 高思峰. 飞行器红外特征分析与红外热成像系统作用距离的预估方法[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
Gao S F. Aircraft infrared radiation analysis and the estimated range of infrared imaging system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [24] 王英瑞. 红外探测器响应非均匀性对系统灵敏度的影响[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(3): 258-261.

- Wang Y R. Influence of non-uniformity of IRFPA responsibility on system sensitivity[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 258-261.
- [25] 齐琳琳, 王晓丹, 吉微. 中远红外光谱区间的海上空大气透过率特性分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(1): 0101002.
- Qi L L, Wang X D, Ji W. Analysis on atmospheric transmittance characteristics of middle-far infrared spectrum in ocean area[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(1): 0101002.
- [26] 陈凡胜, 胡璋悦, 李潇雁, 等. 宽幅高分辨热红外遥感成像技术研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 1210002.
- Chen F S, Hu Z Y, Li X Y, et al. Research on wide-range and high-resolution thermal infrared remote sensing imaging technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1210002.

Detectability of Low Characteristic Aircraft Based on Different Ground-Based Infrared Visual Range Prediction Models

Zhang Teng¹, Meng Xiaying², Gao Wenqiang¹, Wang Hongli³, Niu Qinglin^{1*}

¹*School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;*

²*National Key Laboratory of Scattering and Radiation, Shanghai 201109, China;*

³*School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China*

Abstract

Objective Low signature aircraft adopt active or passive methods to reduce the characteristic difference between themselves and surrounding backgrounds, such as high-temperature component cooling, aerodynamic structure layout optimization, and absorbing coating, which brings great challenges to detection systems. The aerodynamic heating of aircraft is difficult to eliminate, which thus provides a radiant source for the infrared detection system. The development of high sensitivity infrared detectors further promotes the detection of low characteristic aircraft by infrared detection systems. Maximum detection range (MDR) is an important performance indicator of infrared detection systems, which is not only related to the target's infrared radiation characteristics but also closely related to the system's visual range prediction model. At present, most research focuses on analyzing the detectability of targets based on a single visual range prediction model. Especially, with low characteristic aircraft as the research object, there is a lack of research on using multiple visual range prediction models for detectability analysis. Therefore, we take low characteristic aircraft as the research object and conduct research based on multiple visual range prediction models, which can provide theoretical support for the detection and recognition of low characteristic aircraft and detector design.

Methods A fly-wing configuration aircraft was taken as the research object. The surface temperature of the aircraft was predicted using the computational fluid dynamics (CFD) method, based on the assumption of a radiative balance wall. The radiative transfer equation (RTE) was solved through the line of sight (LOS) method, taking into account the situation of light being obstructed by the aircraft's skins. The atmospheric transmittance was borrowed from the MODTRAN software. Three ground-based visual range prediction models were established, including noise equivalent flux density (NEFD), minimum detectable temperature difference (MDTD), and minimum resolvable temperature difference (MRTD) algorithms. Finally, an end-to-end numerical simulation model to predict the MDR and maximum detection zenith angle of fly-wing configuration aircraft was established.

Results and Discussions For the fly-wing aircraft, the radiance in the long wave infrared (LWIR, 8–12 μm) band is two orders of magnitude higher than that in the medium infrared wave (MWIR, 3–5 μm) band. The radiation intensity of the back and abdomen of the aircraft is the highest, and the radiance in the side-view observation is basically the same (Fig. 7 and Fig. 8). The MDR of the NEFD visual range prediction model is nearly one order of magnitude higher in the LWIR band than that in the MWIR band. However, the MDR of the MDTD and MRTD models is approximately equal in both bands. In the LWIR band, the MDR and the maximum detection zenith angle calculated by the three visual range prediction models in descending order are as follows: NEFD>MDTD>MRTD. In the MWIR band, the MDR of the MDTD model is the largest compared with the other two models. The MDR of the NEFD model within the detection plane containing pitch angle variation is about 170 km, which is suitable for detecting the back and abdomen of the aircraft. However, the MDTD and MRTD models have the MDRs in the bottom-view observation, with an MDR of 57 km and 38 km, respectively (Fig. 9 and Fig. 10). Within the side-view observation plane, the MDR calculated by the NEFD

model is approximately 62 km (Fig. 11 and Fig. 12). Under different observation levels including discovery, classification, and recognition, the low characteristic aircraft can be detected by the MRTD model, but the MRTD model fails to detect such fly-wing aircraft under the identify level (Fig. 14).

Conclusions 1) The radiance in the LWIR band is two orders of magnitude higher than that in the MWIR band. The radiation intensity in the top-view observation is nearly one order of magnitude higher than that in the side-view observation. It is indicated that infrared radiation intensity has strong selectivity in terms of spectral bands and detection angles. 2) The MDR of the NEFD model in the LWIR band is nearly one order of magnitude higher than that in the MWIR band, and the MDRs of the MDTD and MRTD models in the MWIR band and LWIR band are basically the same. In the LWIR band, the MDRs of the three models are sorted in descending order: NEFD>MDTD>MRTD. 3) In the detection plane of the pitch angle, the MDR of the NEFD model in the top-view and bottom-view is about 170 km, and the MDRs of the MDTD and MRTD models are 57 km and 38 km, respectively. 4) The MRTD model can detect aircraft at discovery, classification, and recognition observation levels, but it is invalid at identify level.

Key words visual range prediction models; ground-based detection; infrared radiation; low characteristic; detection range