

DOI: 10.3969/j.issn.2097-180X.2024.03.003

国外某型隐身飞机红外辐射特性及低空可探测性分析

田 浩, 王旌尧, 王久龙, 邢 妍

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要:以国外某型号隐身飞机为分析对象,通过建立飞机不同部位的红外光谱辐射模型、双向反射率(BRDF)模型和大气吸收/散射模型,计算得到在北半球中纬度夏季几种典型太阳入射角度、观测角度和飞行状态下,飞机的空间辐射能量分布。在此基础上建立低空探测模型和探测场景,并分析国外装备的某机载红外搜索跟踪系统(IRST)对该隐身飞机的探测能力。研究表明,加力状态、大气条件、太阳入射角、蒙皮反射率、探测波段和探测角度都会影响飞机的红外辐射特性和可探测性。在低空探测模式下,阳光反射的影响相对有限,辐射强度主要受加力状态和探测波段的影响,在空间分布上呈现显著的多样性和差异性。

关键词:隐身飞机;红外辐射;双向反射率;红外搜索跟踪系统;探测距离

中图分类号: TN976

文献标识码: A

文章编号: 2097-180X(2024)03-0167-06

近年来,随着国外新型隐身战斗机的不断列装和全球范围大量部署,其优异的雷达隐身性能和低空突防能力对国土防空造成的威胁日益严峻^[1-3]。随着新型燃料、低发射率涂层和二元矢量喷管等新材料和新技术的应用,飞机的红外隐身性能也得到了明显提升^[4-7]。据报道,在采用了复合材料和蒙皮冷却技术后,国外某隐身飞机在超音速巡航状态下机身和发动机的红外辐射强度降低了约40%^[8],大大提高了其逃避天基红外预警探测的概率^[9-10]。但是,在低空探测模式下,由于飞行高度低(<15 km),探测距离短(<200 km),相比数百至一两千公里高度的天基探测,大气对目标红外辐射能量的衰减效应较弱,再加上目标对阳光和环境的反射效应,即使目标本体辐射的红外信号强度很低,也有较大概率被红外搜索跟踪系统(IRST)等机载红外探测器捕捉到^[11]。目前公开报道的以IRST为代表的低空反红外隐身探测能力研究的文献比较有限,其中文献[12-17]分析了飞机目标本身的红外辐射特性和AIM系列空空导弹红外导引头的探测能力,但对于不同观测路径下大气吸收、散射以及阳光反射等环境因素的影响缺乏深入研究,而且分析方法基本限制于单一谱段,对于不同谱段的IRST低空探测性能也缺乏系统性分析。因此,本文深入分析隐身飞机的红外辐射特性分布,尤其是在不同光照条件和飞行状态下的空间光谱辐射能量分布,有

助于确定低空探测模式下更合适的探测谱段。同时,通过计算IRST等机载红外探测装备在空间不同方向对隐身目标的最大探测距离,可以为低空反隐身突防的战术设计提供技术参考,具有较强的现实意义。

1 光谱辐射特性

1.1 机身、喷管及尾焰温度

1) 机身温度

根据相关报道的国外某型隐身飞机外形和尺寸参数,建立等比例气动分析模型。给定飞行高度为10 km,飞行速度为1.6 Ma,攻角为0°,利用计算流体力学(CFD)软件,计算飞机机身气动温度分布,计算结果如图1所示。机身表面温度范围为286~328 K,按可视面积加权,计算4个不同观察方向平均温度:上方为300.4 K、下方为296.2 K、正面为304.8 K和侧面为298.6 K。

2) 喷管及尾焰温度

根据相关报道,该隐身飞机发动机采用二元喷管、优化涵道比、新型燃料以及多层复合隔热材料等措施后,据推测其喷管表面温度控制在400 K以下,尾焰温度在加力和不加力状态下分别控制在700 K和600 K以下^[10]。相比前几代飞机,有效减小了飞机的红外辐射强度,大幅降低了其被红外探测器发现的概率^[9]。

收稿日期: 2024-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(62105326)

作者简介: 田 浩(1985-),男,副研究员,主要从事天基光电预警探测以及光电对抗技术研究。

通信作者: 邢 妍(1988-),女,副研究员,主要从事光子计数成像探测器以及光电对抗等研究。E-mail: xingy2013@163.com

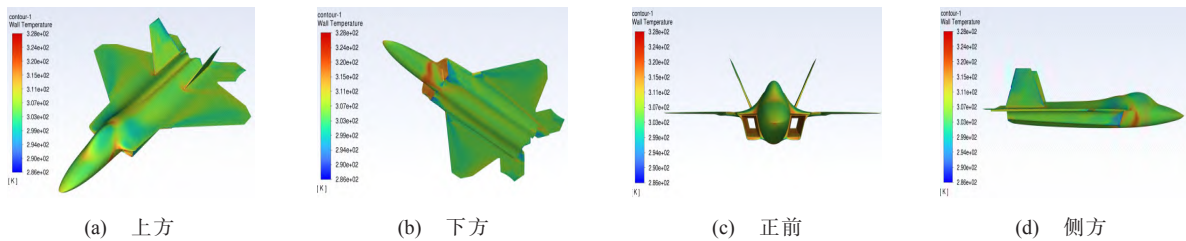


图1 机身气动温度分布

1.2 光谱辐射能量

利用普朗克辐射公式,计算飞机表面在 2π 空间沿给定观测方向的光谱辐射能量 $L(\lambda)$:

$$L(\lambda)=\varepsilon(\lambda)\tau(\lambda)AE(\lambda)=\varepsilon(\lambda)\tau(\lambda)A\pi^{-1}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\frac{c_1\lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)}-1}d\lambda \quad (1)$$

式中,各参数采用国际标准单位. $\varepsilon(\lambda)$ 为飞机表面红外半球发射率,是波长 λ 的函数; $\tau(\lambda)$ 为大气光谱透过率,也是波长 λ 的函数; λ_1 和 λ_2 分别为观测波段的起始和终止波长; A 为飞机表面沿观测方向的投影面积; $E(\lambda)$ 为空间光谱辐射强度($\text{W}/(\text{m}^2\cdot\mu\text{m}\cdot\text{sr})$); $c_1=3.742\times10^{-16}\text{W}\cdot\text{m}^2$,为第一辐射常数; $c_2=1.439\times10^{-2}\text{m}\cdot\text{K}$,为第二辐射常数; T 为飞机表面热力学温度.

在北半球夏季的无云条件下,10 km 高空的

大气光谱透过率分布如图2所示.

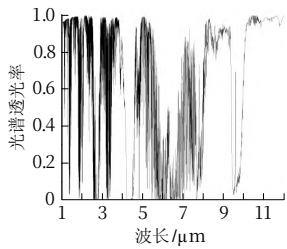


图2 大气光谱透过率分布

利用大气光谱透过率数据,计算飞机经过大气吸收和散射后的4种光谱辐射强度 $E(\lambda)$ 空间分布,如图3所示.

从图3计算结果看出,在相同的谱段内,飞机蒙皮和尾焰的光谱辐射强度相差2个数量级,这是造成其红外探测特征出现显著差异的根本原因.

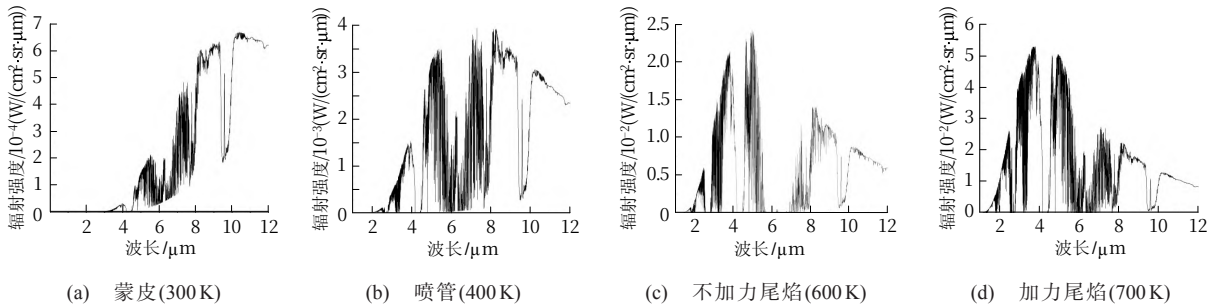


图3 飞机4种 $E(\lambda)$ 空间分布

为方便后续的分析计算,建立如图4所示的

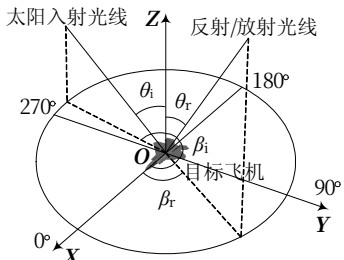


图4 光线坐标系

光线坐标系.其中以飞机本体为原点 O ,以飞行平面作为方位角平面,方位角 β 沿飞机飞行方向逆时针 $0^\circ\sim360^\circ$ 均匀分布.入射光线和反射光线的位置分别由 (θ_i,β_i) 和 (θ_r,β_r) 描述,其中天顶角 θ 定义为光线与飞行平面法线之间的夹角,取值范围 $0^\circ\sim90^\circ$.将 $E(\lambda)$ 计算结果代入式(1),积分得到飞机在不同飞行状态的红外辐射能量空间分布(天顶角 $\theta=90^\circ$),如图5所示.

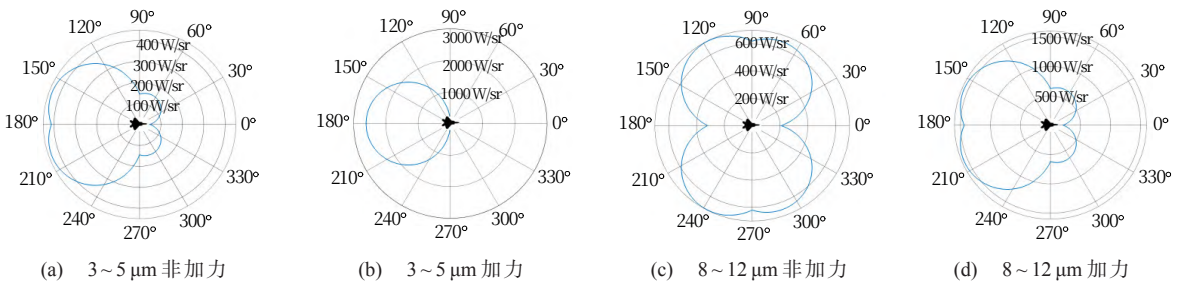


图5 $\theta=90^\circ$ 时飞机红外辐射能量空间分布

从图5可看出:①飞机在不同飞行状态、观测谱段和观测角度下的红外辐射能量有较大差异. ②在加力状态下的辐射能量明显高于非加力状态,其中波(3~5 μm)加力状态的辐射能量值最高,尤其后视姿态(150°<β<210°)的辐射能量值超过了2600 W/sr. ③在中波非加力状态的辐射能量值最低,尤其是前视姿态(60°<β<300°),辐射能量值仅为40~150 W/sr. ④在前视姿态(90°<β<270°)下,长波(8~12 μm)的辐射能量值均明显高于同样角度下的中波辐射能量值,说明在看不见飞机尾焰的探测角度下,长波波段具有更强的观测优势.

2 反射/散射特性

飞机对太阳光的反射和散射是造成红外探测虚警的重要原因. 在不同的光照条件、飞行姿态和观测角度下,飞机的反射/散射特性有较大差异.

2.1 阳光辐照特性

图6给出了在北半球夏季白天10 km高空的

太阳光谱辐照强度分布. 其中3~5 μm中波的辐照强度比8~12 μm长波的辐照强度高出大约2个数量级.

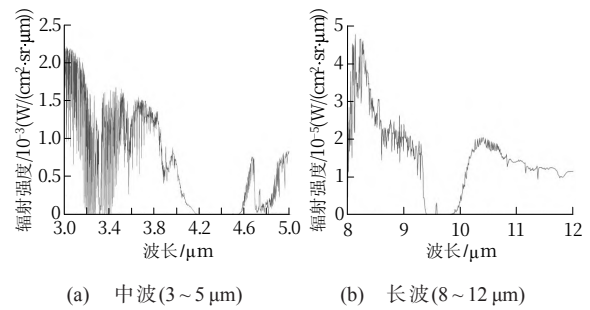


图6 北半球夏季白天太阳光谱辐照强度分布

2.2 双向反射率模型

为了分析太阳反射和散射效应对飞机红外辐射特性的影响,必须建立飞机表面对阳光的双向反射率(BRDF)模型. 在Schlick模型的基础上,结合蒙皮材料的表面粗糙度和反射系数的实验测量结果,通过优化近似值的方法得到飞机蒙皮在典型入射角条件下,对中波和长波红外辐射能量的空间反射率近似分布,如图7所示.

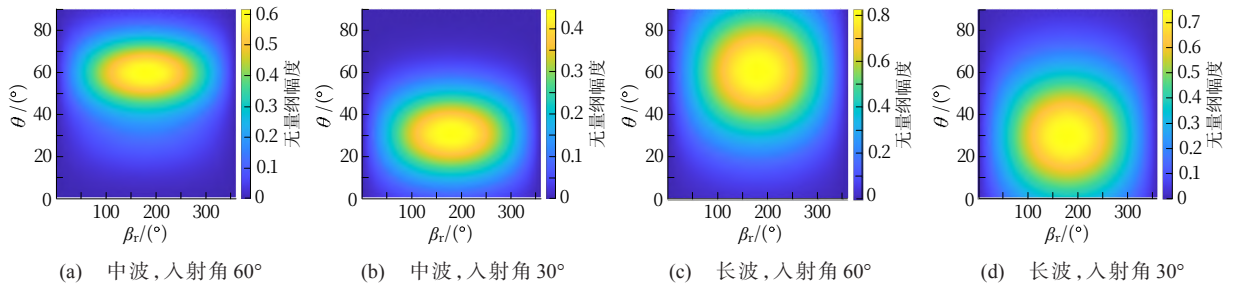


图7 飞机蒙皮对红外辐射能量的空间反射率分布

从图7可看出:①当太阳光分别以30°和60°的天顶角入射时(假定入射方位角均为0°),飞机蒙皮对于8~12 μm长波的反射率明显高于3~5 μm中波反射率,且在空间分布规律上有较大差异. ②飞机蒙皮对于中波的高反射率区域更多的集中在和入射天顶角相近的反射天顶角区间(即中波反射更加趋向于镜面反射特性),而长波的高反射率区间分布则更为分散(即长波反射更趋向于灰漫反射).

2.3 空间反射/散射能量分布

将图6的太阳光谱辐照强度数据代入式(1),

积分后再代入图7的空间反射率模型,计算得到飞机表面对太阳红外反射/散射能量的空间分布,如图8所示.

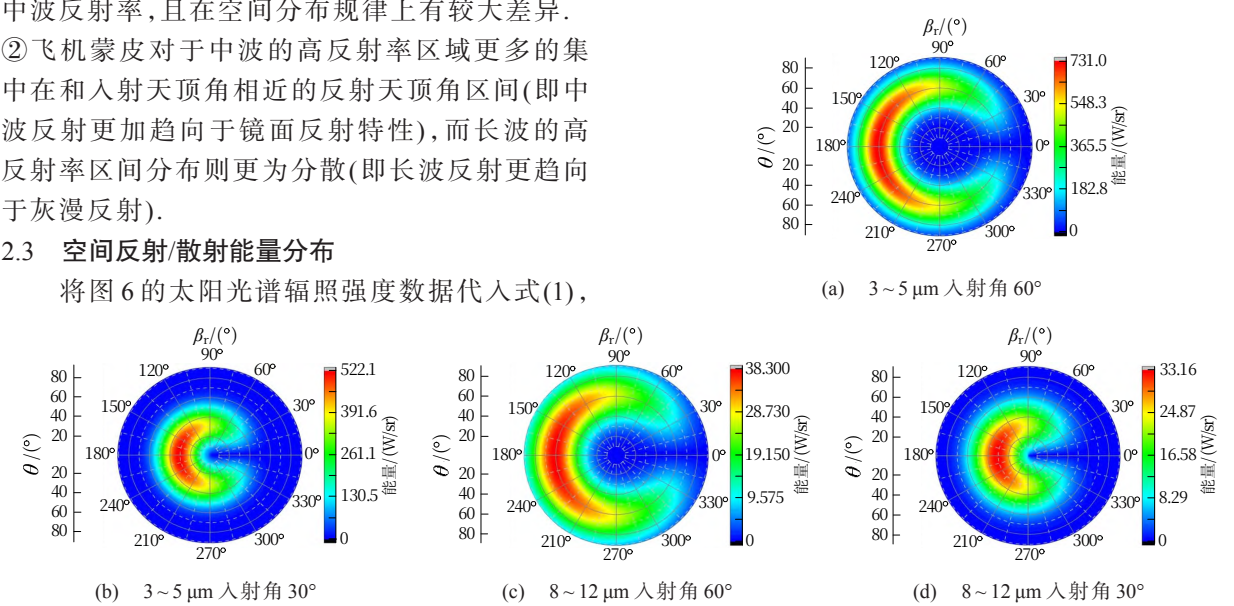


图8 蒙皮红外反射/散射能量空间分布

从图 8 可知：①飞机蒙皮对不同波长、不同入射角太阳光线反射特性均不相同，其反射能量在数值和空间分布上都有较大差异。②对中波(3~5 μm)的反射能量比长波(8~12 μm)高出 1 个数量级，中波反射能量峰值(500~700 W/sr)已经与飞机自身的中波辐射水平相当。相比之下，长波反射能量值(<40 W/sr)远低于飞机自身的长波辐射水平，在分析中可以忽略。③在空间分布上，随着反射天顶角 θ_r 的增大，反射光线的能量迅速衰减，且中波的反射能量衰减速度明显大于长波。④对于入射天顶角 60°工况，当反射天顶角 θ_r 超过 80°时，中波的反射能量值低于 95 W/sr，长波的反射能量值低于 12 W/sr，此时无论中长波的反射能量值都远低于飞机自身的辐射能量水平，说明此时反射效应对红外探测的影响已经非常有限。

3 低空探测模型

在低空探测场景下，红外探测器(例如机载IRST)与目标飞机基本处于同一高度，或者高度差通常在几公里之内，探测距离一般在几十公里到一两百公里。相比探测距离达到数百甚至数千公里的天基红外预警，在低空红外探测场景下，目标的光谱辐射空间分布，尤其是在较大反射天顶角时的辐射能量分布特性，会对实际探测性能产生重要的影响。

据此建立图 9 所示的低空红外探测模型。以IRST为例，给定探测器和飞机飞行平面的最大高度差为 $H_{\max}$ ，最大探测距离为 $R_{\max}$ ，最远探测距离为 $R_{\min}$ ，其对应的反射天顶角 θ_r 分别为 $\theta_{r,\max}$ 和 $\theta_{r,\min}$ 。考虑到图 7 给出的飞机蒙皮对中波和长波的反射率空间分布特性，对应 50~200 km 探测距离的极限反射天顶角修正结果如表 1 所示。当太阳入射天顶角 θ_i 小于表 1 所示极限值时，探测器接收到的反射光线的红外光谱能量将急剧减小，对目标探测的影响也将显著减弱。

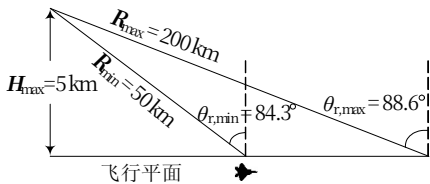


图 9 低空红外探测模式示意图

表 1 低空探测模式下极限反射天顶角 BRDF 修正结果

探测波 段/μm	50 km 探测距离对应的 极限反射天顶角/(°)	200 km 探测距离对应的 极限反射天顶角/(°)
3~5	73.6	79.4
8~12	66.2	71.3

根据公开的气象数据资料(历年统计平均值)，在北半球地区(以北纬 30°，东经 120°为例)，7 月 12 日白天(8:00—17:00)太阳光入射天顶角随时间变化曲线如图 10 所示。阳光最大入射天顶角发生在 17:00 左右，大约为 64.8°，仍小于表 1 给出的极限天顶角(66.2°~79.4°)。因此可以近似认为，北半球夏季白天的阳光反射不会对图 9 所示的低空红外探测模式造成明显影响。

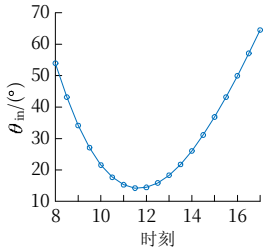


图 10 北半球夏季太阳入射天顶角曲线

4 探测能力分析

低空红外探测距离 R 计算公式^[12]为

$$R=[\pi\Delta I\tau_0(\lambda)\tau(\lambda)DD^*(2\cdot 2^{1/2}F\rho_{\text{SNR}})^{-1}(t_{\text{int}}/\omega)^{1/2}]^{1/2} \quad (2)$$

式中，各参数均采用国际标准单位； ΔI 为目标与探测背景的红外辐射能量差值(W/sr)； $\tau_0(\lambda)$ 为光学系统光谱透过率； $\tau(\lambda)$ 为大气光谱透过率； D 为光学系统入瞳直径； D^* 为探测器的平均探测率($\text{m}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$)； F 为光学系统 F 数， $F=f/D$ ， f 为光学系统焦距； ρ_{SNR} 为探测器的极限信噪比，对远距离微弱目标的成像探测一般取 4~5； t_{int} 为探测器积分时间； ω 为探测器瞬时视场角(sr)。

根据美国IRST探测器性能参数^[13]，将图 5 给出的飞机本体辐射能量数据与图 8 给出的空间反射能量数据代入式(2)，当 $84^\circ<\theta_r<90^\circ$ 、 $0^\circ<\beta_r<360^\circ$ 时计算得到飞机在图 9 所示的低空红外探测模式下 4 种情况的最大探测距离分布如图 11 所示。

从图 11 看出：

1)综合考虑飞机本体辐射、大气吸收/散射与阳光反射效应以后，低空红外探测模式下的最大探测距离，在不同谱段、探测角度和飞行状态下表现出明显的差异性。总体来看，飞机后视区域(θ_r 在 $90^\circ\sim270^\circ$ 区间)探测距离高于前视区域(θ_r 在 $-90^\circ\sim90^\circ$ 区间)，加力状态探测距离高于非加力状态。

2)最大探测距离出现在中波(3~5 μm)加力状态的近尾区域(θ_r 在 $150^\circ\sim210^\circ$ 区间)，超过 200 km；而最小探测距离出现在中波(3~5 μm)前视区域(θ_r 在 $-90^\circ\sim90^\circ$ 区间)，仅为 30 km 左右。

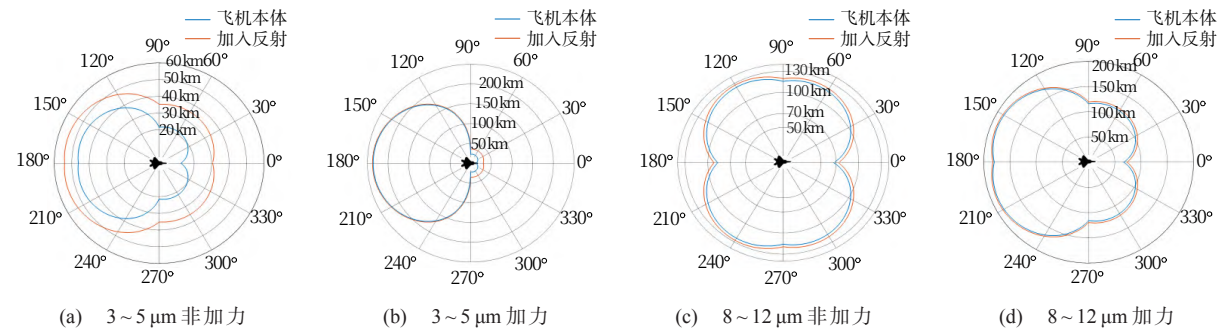


图 11 84°<θ_r<90°、0°<β_r<360°时4种情况的低空红外最大探测距离分布

3)长波(8~12 μm)前视区域(θ_r在-90°~90°区间)的探测距离均明显高于同样角度下的中波(3~5 μm)探测距离(约3—4倍),说明在前视区域,长波波段具有更远的探测距离。由图11(d)可知,在加力飞行状态下,对长波(8~12 μm)谱段的最大探测距离发生在反射方位角θ_r位于135°~170°以及190°~225°区间。

4)阳光反射效应对中波(3~5 μm)非加力工况的影响最为显著,相比飞机本体辐射的探测距离增加了9.2~15.7 km,尤其是前视区域(θ_r在-90°~90°区间)的探测距离增加幅度最大。

5)对中波(3~5 μm)加力工况的前视区域(θ_r在-90°~90°区间)探测距离增加大约一倍。由于反射天顶角的限制(84°<θ_r<90°),在图9所示的低空红外探测模式下,阳光反射效应对其他工况探测距离的影响很小,可以忽略。

5 结论

1)从目标光谱特性角度研究了国外某型隐身飞机的红外辐射特征和低空可探测性能,通过对IRST低空探测场景进行建模仿真,分析了决定其低空红外辐射能量分布的几个关键因素的影响规律。

2)研究结果表明:①在中波(3~5 μm)谱段,即使目标处于加力飞行状态,其在反射方位角θ_r位于-90°~90°广大范围的峰值辐射能量仍低于200 W/sr,考虑到云层的影响,对于单谱段红外搜索跟踪系统(IRST)探测器具有较高的逃逸概率。②隐身飞机在加力状态下,中波(3~5 μm)谱段的最大探测距离在反射方位角θ_r位于150°~210°区间,长波(8~12 μm)最大可探测距离在反射方位角θ_r位于135°~170°以及190°~225°区间,在重点检测区域的目标可能飞行线路上,应加大上述方向的探测力度。③在北半球中纬度夏季白天17:00以后,中波(3~5 μm)反射有较高概率对IRST探测器造成干扰;在北半球中纬度夏季白天,长波(8~12 μm)反射对IRST实际探测性能

不会产生明显影响。

3)根据研究结果,建议IRST采用涵盖中波(3~5 μm)和长波(8~12 μm)的双波段探测器,以有效提高对目标前视区域的探测距离。对于目标有翻滚动作以及有云层干扰的情况,需要做进一步的研究分析。

参考文献:

[1] 陈辛,张俊宝.空战模式演变与隐身空战形态发展分析[J].航空兵器,2022,29(3):1-7.
[2] 姬伟杰.反隐身飞机突防战术仿真[J].电讯技术,2023,63(8):1133-1138.
[3] 穆阳.在役军机隐身优化设计与改造技术研究[J].火力与指挥控制,2022,47(10):1-5.
[4] 周鹏飞,朱洪立,李明俊,等.超材料在军用隐身中的应用研究[J].材料工程,2024,52(2):112-121.
[5] 池琴,郭丽敏,乌兰格日乐.光学红外隐身涂层织物的制备与性能研究[J].电镀与精饰,2023,45(12):33-41.
[6] 陈海通,王进美,王丞,等.红外隐身材料的应用及其研究进展[J].印染,2023,49(11):81-86.
[7] 杨毓鑫,王学新,张旭,等.红外隐身涂料环境发射率校准技术[J].应用光学,2023,44(3):655-660.
[8] 李丽娟,刘珂,徐振亚,等.红外成像导引头对隐身飞机探测性能提升途径分析[J].航空兵器,2024:1-7(2023-10-10) [2024-04-10].<https://www.cnki.net/>.
[9] 李波.红外隐身技术的应用及发展趋势[J].中国光学,2013,6(6):818-823.
[10] 宋新波,吕雪艳,章建军.飞机红外隐身技术研究[J].激光与红外,2012,42(1):3-7.
[11] 汪朝群.空中目标的红外隐身及探测跟踪技术[J].红外与激光工程,2006(S1):127-132.
[12] 何苹,王莹莹,岳韶华,等.先进红外传感器对隐身飞机作用距离估算研究[J].红外技术,2020,42(9):899-904.
[13] 黄中华,冯彦辉,刘于.国外机载光电瞄准设备发展[J].电光与控制,2021,28(10):61-66.
[14] 柴世杰,童中翔,李建勋,等.典型飞机红外辐射特性及探测仿真研究[J].火力与指挥控制,2014,39(8):26-29.
[15] 宗靖国,张建奇,刘德连.隐身飞机尾焰的红外辐射特性[J].光子学报,2011,40(2):289-294.
[16] 张亮,赵锋,王雪松.视线方向上飞机红外特性及大气衰减模型研究[J].红外技术,2011,33(6):367-371.

[17] 曲兆俊,张二磊,周方方.F35 隐身战斗机红外辐射特性建

模[J].红外技术,2014,36(11):920-925.

Analysis of infrared radiation characteristics and low-altitude detectability of a foreign stealth aircraft

TIAN Hao, WANG Jingyao, WANG Jiulong, XING Yan

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Taking a certain type of foreign stealth aircraft as the analysis object, and by establishing infrared spectral radiation models, Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) model and atmospheric absorption/scattering models for different parts of the aircraft, the paper calculates and obtains the spatial radiation energy distribution of the aircraft under several typical solar incidence angles, observation angles and flight attitude in mid-latitude summer of the northern hemisphere. On this basis, the low altitude detection model and detection scenario are established, and the detection capability of a foreign equipped airborne infrared search and tracking system (IRST) to the stealth aircraft is analyzed. The research results are shown as follows: Afterburning state, atmospheric conditions, solar incidence angles, skin reflectance, detection band and observation angles all affect the infrared radiation characteristics and detectability of the aircraft. In the low-altitude detection mode, the effect of solar reflection is relatively limited, and the radiation intensity is mainly affected by the afterburning state and detection band, showing significant diversity and difference in spatial distribution.

Key words: stealth aircraft; infrared radiation; BRDF; IRST; detection range

(上接第 166 页)

SAR image recognition method of improved convolutional neural network

LUO Man, LI Xin

(Hubei Electronic Information Products Quality Supervision and Inspection Institute, Wuhan 430000, China)

Abstract: SAR images exist speckle noise and distinction between different image categories is poor, which makes it difficult to extract representative features. In order to solve this problem, an improved convolutional neural network for SAR image recognition method is proposed. Firstly, a multi-scale feature extraction module is designed to fully extract the hidden information of SAR images by using convolution layers of different scales. Then, by improving classical residual neural network residual block, a dense residual block structure is designed to provide rich detailed information for the back layer and ensure the expression ability of output features. Finally, verification is performed on the MSTAR dataset. The experimental results show that the recognition rate of the proposed model on the test set is 99.17%, which is better than other methods. After salt-pepper noise of different proportions is added to the test set, the proposed model still shows good robustness.

Key words: convolutional neural network; SAR image; multi-scale feature extraction module; dense residual block; robustness