

DOI: 10.3969/j.issn.2097-180X.2024.01.002

可见光载荷对云海背景下某型隐身飞机探测能力研究

田 浩, 蔡 盛, 王旌尧, 王久龙

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要:为研究可见光探测器对某型隐身飞机探测能力,首先建立可见光波段云-海-大气耦合的多向吸收-散射模型;再通过对飞机蒙皮和尾焰几何截面在不同太阳入射角和卫星观测角度下的反射特性建模分析,计算到达探测器焦平面的目标以及背景的光谱能量分布,从而得到在给定光照条件下探测器极限信噪比和极限探测距离。最后模拟的仿真成像结果验证了分析模型的正确性和结论的可信度。分析结果表明,以云-海为地物观测背景时,云层的上行反射特性对飞机可探测性的影响最为显著;当太阳入射角小于 60° 时,飞机蒙皮的表面双向反射率(BRDF)明显高于海平面;太阳入射角大于 60° 时,云层和海平面对阳光的反射占据主导地位。

关键词:隐身飞机;探测能力;云海背景;可见光探测器;表面双向反射率;太阳入射角

中图分类号: TN976

文献标识码: A

文章编号: 2097-180X(2024)01-0006-05

近年来,随着国外第五代隐身战机全球部署脚步的不断加快,尤其是驻扎在韩国和日本的基地的某型隐身战机数量不断增加,其强大的隐身突防性能对我国的国土防空造成严重威胁^[1]。另外,随着红外隐身技术的成熟,各种新技术、新工艺、新型超材料等正在不断加速应用,通过喷涂复合式涂层以降低特定波段的半球发射率和双向反射率,使得飞机在高速飞行下蒙皮的红外辐射强度在某些观测方向上可以下降60%以上^[2-4];通过研发新配方燃料和改进涵道布局,使飞机在不加力状态下喷射尾焰的中心温度降低到550 K以下,发动机喷口表面温度降低到400 K以下^[5],使得其中波($3\sim 5\mu\text{m}$)和长波($8\sim 14\mu\text{m}$)的红外辐射能量下降1~2个数量级^[6],大大降低了其红外辐射特征。再考虑到地球曲率限制以及大气的吸收和衰减效应,传统的地面雷达和天基红外探测手段对这类新型隐身目标的预警能力正面临越来越严峻的挑战,亟需新的探测手段作为有效补充。

目前,公开的文献研究绝大多数都是针对隐身飞机的红外谱段辐射特性^[7-11]和红外探测能力的分析^[12-16],而针对最新红外隐身技术的反制性手段研究的报道相对较少,难以有效解决目前的急迫需求。本文从目标在可见光波段的可探测性角度展开研究,通过对近地轨道高分辨率可见光载荷对目标覆盖性和探测性能(如信噪比、探测距离、图像识别度)的深入分析,为未来防空体系建设规划提供具有一定参考价值的技

术支撑。

1 可见波段云-海-大气耦合的多向吸收-散射模型

1.1 目标建模

利用计算流体力学(CFD)软件计算超音速流场的气动效应,图1给出了某型隐身战斗机的等比例模型在9 km高度,以1.2 Ma速度和 0° 攻角巡航时的流场压力分布。从图1可看出,在不加力巡航状态下,发动机尾焰长度达到了6.2 m。据此确定目标轮廓尺寸:机身长19 m,翼展14 m,机身上部面积 93 m^2 ,尾焰长6.2 m,底部宽2.9 m,尾部宽0.8 m,尾焰中心截面近似为梯形。

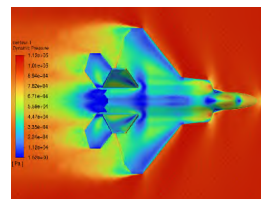


图1 某型隐身战斗机绕流场压力云图

在目标模型上建立图2所示的天基观测坐标系。其中, OXY 为目标飞行平面, OX 为飞行方向, OZ 为目标表面法向,卫星对目标的俯仰角 α 定义为平台观测方向 SO 与目标表面法向 OZ 的夹角,取值范围是 $0^\circ\sim 90^\circ$;卫星对目标的方位角 β 定义为平台观测方向 SO 在飞行平面 OXY 的投影 GO 与飞行方向 OX 的夹角,取值范围是 $0^\circ\sim 180^\circ$;太阳入射角 θ 定义为太阳光线与目标表面

收稿日期: 2024-02-28

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

通信作者: 王久龙(1990-),男,副研究员,从事光学载荷总体论证、建模与仿真等研究。E-mail: wangjiulong@ciomp.ac.cn

法向 OZ 的夹角,取值范围是 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

在计算目标表面双向反射率(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)的时候只考虑太阳光线相对目标飞行平面法线的入射角 θ 的变化,而太阳光线相对目标不同表面的入射角和散射方向则通过坐标变换的方式进行迭代计算。为了减小计算量,提高计算效率,BRDF 模型对于观测视轴(SO)以外的散射光线追踪采用逐次合并计算的方式。

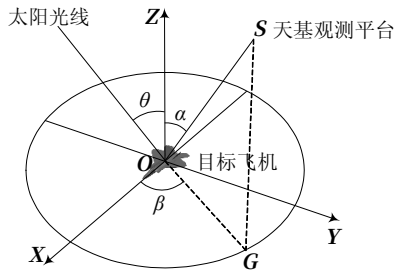


图2 天基观测坐标系示意图

机身蒙皮材料为2mm厚度的镁铝合金,当太阳入射角 $\theta=40^\circ$ 、散射角为 0° 时其表面隐身涂层在 $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 可见光谱段的BRDF计算模型参见文献[17]。计算结果表明:当方位角 β 接近 180° 观测方向,即迎着飞机尾部观测时,受到发动机尾焰的影响,BRDF分布出现明显的阶跃,数值迅速增大。而除了这一特殊观测角度,在绝大部分观测角度范围内,蒙皮对可见光的反射率在 $0.07 \sim 0.12$ 之间。因此,在后续的分析计算中,主要考虑太阳入射角 θ 和观测俯仰角 α 对BRDF的影响。

尾焰中心温度给定550K,其在 $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 谱段的辐射强度如图3所示。同北纬度夏季到达地表10km高度的阳光辐射强度(约为 $0.12 \sim 0.20 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$) 相比,可以认为550K中心温度的尾焰在可见光谱段的辐射能量可以忽略不计。

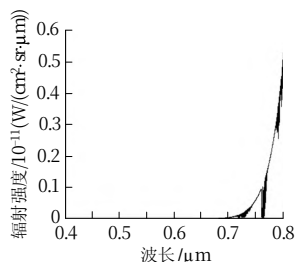


图3 550K中心温度尾焰光谱辐射强度

1.2 云-海-大气散射

在 $5 \sim 10 \text{ m/s}$ 风速条件下某海平面在8月份白天10:00—15:00时段,对可见光谱段的BRDF分布见文献[18]。在大部分观测角度范围内,海平面对可见光谱段的反射率在 $0.03 \sim 0.12$ 之间,在俯仰角 α 超过 80° 、方位角 β 接近 180° (即接近临

边观测模式)时,反射率会迅速增大到 $0.3 \sim 0.4$ 。

在天基探测时,云层背景具有很强的向上散射效应,探测器主要受到云层自身辐射及其对太阳光上行散射的影响。由于云层中包含大量尺度不一、形状各异的冰水粒子,对太阳有较强的散射作用,可能会对目标的天基探测造成较大干扰,必须给予重点关注和考虑。云层上行散射特性也可以近似用BRDF特性描述,北半球夏季白天10:00—15:00时段,高度 $5 \sim 10 \text{ km}$ 冰晶云层(即高空卷云)在 40° 太阳入射角照射下,在 $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 可见光谱段BRDF如图4所示。

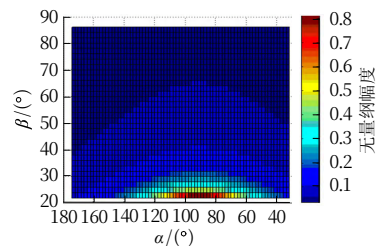


图4 云层上行BRDF分布(太阳入射角 $\theta=40^\circ$)

由图4可以看出,在相同入射角度下,高空卷云层在可见波段的双向反射率普遍比海平面要高,平均值为 $0.06 \sim 0.18$,而且反射率峰值出现的范围(即观测俯仰角 α 和方位角 β 范围)也要比海平面大,这就说明在阳光入射角较小时,相比海平面,卷云层对阳光的上行散射程度更高。

在北纬度夏季白天10:00—15:00时段,大气层对10km高度反射的 $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 谱段光线透过率如图5所示。由图5可以看出,无论是海平面、云层还是飞机蒙皮,其反射和散射光线的大气透过率基本在 $0.5 \sim 0.7$ 之间,代入模型计算的时候可以近似取平均值0.6。

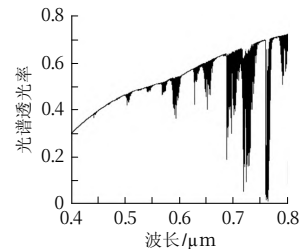


图5 北纬度夏季白天大气可见光谱段透过率分布

2 某型隐身飞机探测能力分析

2.1 探测器模型性能

表1给出太阳同步轨道某高分辨率可见光线阵探测器参数。据此建立卫星平台以星下点轨迹为几何中心推扫成像探测模型,探测器每推扫一次,焦平面参与成像的像元矩阵为 $4000 \times 4 \times 2$ 。

综合考虑大气吸收、云层散射、蒙皮散射等能量衰减因素以及海面阳光反射等背景杂波影

表 1 近地轨道某可见光线阵探测器性能参数

参数	取值
轨道类型	太阳同步轨道
轨道高度	500 km
轨道倾角	97.4°
口径	330 mm
焦距	4050 mm
视场角	0.46°
像元规模	4096×4(拼接)
像元尺寸	4.5 μm
地面分辨率	0.5 m
幅宽	7.8 km
积分时间	10 ms
信噪比阈值	5

响,图 6 给出了上述可见光探测器的像元信噪比随太阳入射角 θ 和观测俯仰角 α 的变化规律. 从图 6 可以看出,当太阳入射角 $\theta>60^\circ$ 时,探测器信噪比出现明显衰减,且随着观测俯仰角 α 的增加,信噪比衰减程度进一步加强. 以太阳入射角 $\theta=60^\circ$ 为例,当俯仰角 α 超过 46° 时,信噪比开始低于阈值 5,此时探测器对飞机目标已经无法清晰成像.

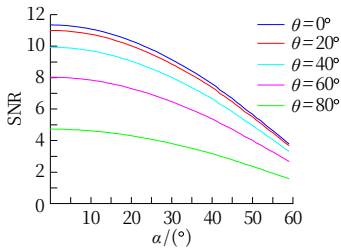


图 6 可见光探测器像元信噪比随 θ 和 α 分布

2.2 探测能力分析

对于天基可见光探测器而言,衡量其对地面目标探测能力的指标一般是极限探测距离. 此时,目标在探测器焦平面轮廓像元与周边像元的灰度梯度值接近或达到图像判读极限,能量信噪比接近或达到阈值. 可见光探测器对地观测时的极限探测距离 R 与太阳入射角 θ 、观测角 α 以及目标 BRDF 之间的关系如下:

$$E_m = \gamma_{\text{BRDF}} E_{\text{SS}} \tau_0 \cos \theta \cos \alpha / R^2 \tag{1}$$

式中, E_m 代表到达探测器入口处的目标反射的可见光波段总能量(单位 W), γ_{BRDF} 代表目标表面的双向反射率函数(无量纲), E 代表到达目标飞行高度的太阳辐照度(可查表获得,单位 W/m^2), S 代表目标表面的有效反射面积(单位 m^2), S_0 代表探测器入瞳面积(单位 m^2), τ_0 代表探测器的光谱透过率(无量纲), θ 代表太阳入射角(单位弧度), α 代表观测俯仰角(单位弧度), R 代表探测距离(单位 m).

在得到进入探测器的目标反射光线总能量 E_m 之后,目标反射的可见光信号经过传感器转换后得到的电荷数 N ,其计算公式为

$$N = \eta \epsilon t_0 E_m / ((hc/\lambda)M) \tag{2}$$

式中, η 代表量子效率, ϵ 代表像元填充因子, t_0 代表光学系统的曝光时间(单位 s), h 代表普朗克常数(取 $6.6261 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$), c 代表光速(取 $2.9979 \times 10^8 \text{m/s}$), λ 代表可见光谱段的中心波长(取 $6.8 \times 10^{-7} \text{m}$), M 代表目标光斑在传感器上所占的像元数量.

在得到传感器转换电荷数 N 之后,结合传感器手册标定的噪声函数(包括光子噪声 n_{light} 、暗电流噪声 n_{dark} 以及读出噪声 n_{read}),根据阈值信噪比 T_{SNR} 计算公式:

$$T_{\text{SNR}} \leq N / (n_{\text{light}}^2 + n_{\text{dark}}^2 + n_{\text{read}}^2)^{1/2} \tag{3}$$

可得到在 T_{SNR} 条件下的极限探测距离 R 以及极限观测角度 α .

图 7 给出了探测器信噪比阈值为 5 的条件下,探测器极限俯仰角和极限探测距离随太阳入射角 θ 的变化情况.

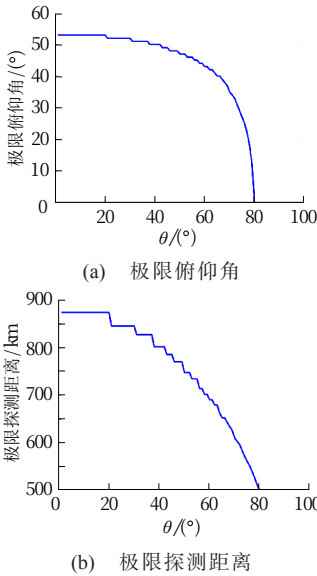


图 7 探测器极限俯仰角和极限探测距离随 θ 分布

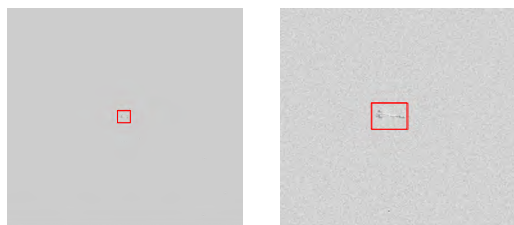
从图 7 看出:①当 $\theta<60^\circ$ 时,俯仰角 α 在 $43^\circ \sim 54^\circ$ 之内均可以保证对飞机目标轮廓的清晰成像,对应的最大探测距离为 $690 \sim 873 \text{km}$. 在卫星高度确定后,观测俯仰角和地面覆盖范围成正比,更大的覆盖范围意味着卫星对目标具有更高的发现概率. ②当 $\theta>60^\circ$ 时,俯仰角 α 会迅速缩小到 $20^\circ \sim 30^\circ$ 范围. 例如,当 θ 增大到 77° 时,为了能使飞机目标轮廓清晰成像,观测俯仰角不能超过 22° ,此时的最大探测距离衰减到 539km ,这会大大减少卫星对地面的覆盖范围,从而降低对飞机目标的发现概率.

利用表 1 参数建立的太阳同步轨道推扫成像模型,结合图 6 和图 7 给出的探测器性能,在不同的太阳入射角 θ 和卫星平台观测俯仰角 α

工况下,对在北半球8月某日白天 14:00 时刻,飞行在距离海面 9 km 高度的某型飞机目标进行可见光模拟成像,如图 8 所示(浅色方块代表云层区域,深色背景代表海平面区域)。其中,左图是原始尺寸图像,右图是放大 5 倍后的中心区域图



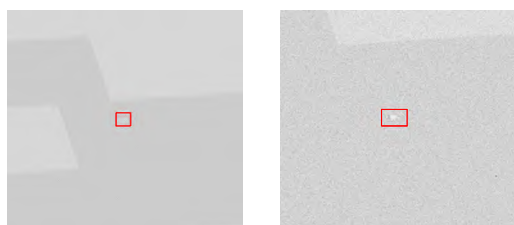
(a) $\theta=25^\circ$, $\alpha=77^\circ$



(b) $\theta=38^\circ$, $\alpha=24^\circ$



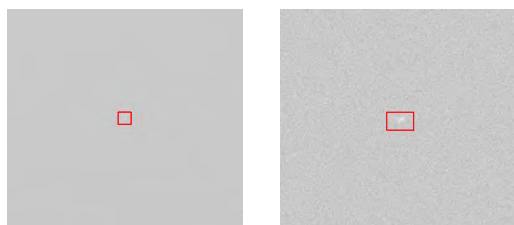
(c) $\theta=46^\circ$, $\alpha=86^\circ$



(d) $\theta=57^\circ$, $\alpha=47^\circ$



(e) $\theta=62^\circ$, $\alpha=18^\circ$



(f) $\theta=66^\circ$, $\alpha=24^\circ$

图8 不同 θ 和 α 条件下某型目标在探测器焦平面的模拟成像

像,红色方框内是目标像元。

由图 8 的模拟仿真成像结果可知:①在北半球 8 月份白天 14:00 时刻,当 $\theta < 60^\circ$ 时,无论天顶角 α 增大或者减小,对飞机图像轮廓的可辨识度(即图像边缘像素灰度梯度分布)的影响都相对较小,也就是说,在给定太阳入射角时,目标在探测器焦平面的辨识度主要受探测距离和目标 BRDF 的影响。②当 $\theta > 60^\circ$ 时,即使天顶角 α 减小到 25° 以内,飞机目标在探测器焦平面轮廓的辨识度仍然严重下降,与 $\theta < 60^\circ$ 时的图像对比,仍无法准确分辨目标的外形轮廓,也就是说,当 $\theta > 60^\circ$ 时,即使将图像放大 5 倍,探测器也无法准确识别目标。这也从另一个角度印证了图 7 得出的结论。

综上所述,在北半球夏季白天,云-海复合背景下,当 $\theta < 60^\circ$ 时,飞机蒙皮反射太阳光线的强度大于云层和海面,此时在探测器焦平面上某型飞机图像轮廓的可辨识度较高,且受观测俯仰角 α 变化影响较小;而当 $\theta > 60^\circ$ 时,云层反射太阳光线的强度超过飞机蒙皮,此时飞机图像轮廓可辨识度严重下降,即使观测俯仰角 α 很小,也无法准确识别外形轮廓。

因此,在北半球夏季白天时段,要提高近地轨道高分辨率可见光探测器对某型隐身飞机目标的发现概率,需要尽量避开有大片高空卷云的探测场景。如果无法避免,则要选在太阳光线以小于 60° 角度入射目标飞行平面的时段(如 8 月份下午 15:00 以前),或者采用较小的观测角度(俯仰角不超过 30°)进行探测,这样才能使探测器保持较高的信噪比和轮廓线像元灰度梯度值,从而准确分辨目标轮廓,提高目标的识别成功率。而在太阳入射角过大时,可以从图像识别算法角度,通过更好的算法模型训练,利用模态融合等技术手段提高对远距离、低信噪比目标的识别成功率^[19]。

3 结论

1)通过分析某型飞机本体以及北半球夏季大气、云层和海洋对太阳入射光线的吸收、反射和散射特性,结合对位于 500 km 太阳同步轨道的 0.5 m 分辨率可见光探测器特性的建模仿真,计算得到在北半球夏季白天、不同太阳入射角和观测角度下上述可见光探测器对某型隐身飞机的探测性能。

2)分析结果表明,太阳入射角小于 60° 时,在北半球夏季白天的云-海探测背景下,可见光探测器可以清晰分辨某型隐身飞机的轮廓特征,此

时的极限探测距离约为 690~873 km;当太阳入射角大于 60°时,由于云层反射太阳光的干扰,无论观测角度如何调整,探测器的分辨能力都会迅速下降,极限探测距离也降低到不足 540 km.

3)本文分析研究了北半球夏季(8月)白天(14:00)在云-海背景下的探测性能和成像特征,但对于其他季节、时段、地理位置以及背景下的探测能力及其变化规律还需要进一步深入研究.

参考文献:

- [1] 曲兆俊,张二磊,周方方.某型隐身战斗机红外辐射特性建模[J].红外技术,2014,36(11):920-925.
- [2] 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.
- [3] 刘晓明,任志宇,陈陆平,等.红外隐身超材料[J].材料工程,2020,48(6):1-11.
- [4] 王新飞,刘东青,彭亮,等.光谱选择性辐射红外隐身材料研究进展[J].航空材料学报,2021,41(5):1-13.
- [5] 袁金,孟宪慧,洪锦放,等.隐身/防热一体化 CFRP 航空发动机舱体设计[J].纤维复合材料,2022,39(3):23-29.
- [6] 于鲲,丛明煜,戴文聪.飞机尾焰的固体粒子红外辐射抑制效果仿真分析[J].光学学报,2020,40(21):191-204.
- [7] 何苹,王莹莹,岳韶华.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.
- [8] 黄臻,姜伟,张杨.飞机红外隐身及探测技术简介[J].红外,2017,38(8):1-7.
- [9] 王芳,罗寰,王海晏,等.机载红外搜索跟踪系统有效探测区域研究[J].激光与红外,2018,48(5):585-590.
- [10] 范光勇.隐身飞机红外特性与探测技术仿真研究[D].成都:电子科技大学,2020:2-4.
- [11] 王超哲,李慎波,黄聪会,等.飞机成像目标的红外隐身效果评估[J].红外与激光工程,2019,48(10):48-56.
- [12] 高原,刘剑,张俊举,等.武器装备红外隐身效果评估方法研究[J].红外技术,2017,39(11):1060-1065.
- [13] 沈飞,兰廷豪,康戈文,等.临近空间基红外探测隐身飞机尾焰的仿真研究[J].上海航天,2017,34(1):73-79.
- [14] 沈飞,丁亮,康戈文,等.F22尾焰红外辐射特性及探测仿真研究[J].现代电子技术,2016,39(5):5-9.
- [15] 韩欣欣,尚柏林,徐浩军,等.隐身飞机敏感性影响因素组合分析[J].北京航空航天大学学报,2019,45(6):1185-1194.
- [16] 崔明明,汪鹏.空空作战飞机敏感性分析研究[J].航空电子技术,2020,51(3):34-40.
- [17] 王申领.某型飞机表面红外反射特性研究[J].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020:12-16.
- [18] 刘朝枢.天基红外预警卷云和临边背景实时仿真[D].西安:西安电子科技大学,2017:38-40.
- [19] 刘珂琪.基于多模态图像融合的目标识别算法研究[D].西安:西安工业大学,2023:50-54.

Research on detection capability of some kind of stealth aircraft by visible light detector payload under cloud-sea background

TIAN Hao, CAI Sheng, WANG Jingyao, WANG Jiulong

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

Abstract: In order to study the detection capability of visible light detector to a certain stealth aircraft, firstly, a multidirectional absorption-scattering model for coupled cloud-sea-atmosphere background in visible light band is established. Then, by modeling and analyzing the reflection characteristics of the geometric cross section of the aircraft skin and tail flame under different solar incidence angles and satellite observation angles, the spectral energy distribution of the target and the background reaching the focal plane of the detector are calculated, so as to get the minimum signal to noise ratio for image recognition and maximum detection range in the given lighting conditions. Finally, the simulated imaging results verify the correctness of the analysis model and the reliability of the conclusion. The analysis results are shown as follows: When the cloud and sea are taken as the background of ground object observation, the upward reflection characteristics of clouds have the most significant influence on the detectability of aircraft; when the solar incidence angle is less than 60°, the surface bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of the aircraft skin is obviously higher than that of the sea surface; when the solar incidence angle exceeds 60°, the reflection of sunlight by clouds and sea surface dominates.

Key words: stealth aircraft; detection capability; cloud-sea background; visible light detector; BRDF; solar incident angle