

# 海洋环境下低特征水面飞行器中长波探测研究

宋敏敏<sup>1,2</sup>, 吕 骏<sup>1</sup>, 桑学仪<sup>1,2</sup>, 薛芬芬<sup>1,2</sup>, 苏建平<sup>1</sup>

(1. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109;

2. 中国航天科技集团有限公司 红外探测技术中心, 上海 201109)

**摘要:** 为了能有效评估中长波复合探测识别低特征水面飞行器目标的优势, 通过建立某飞行器不同探测角度红外辐射模型, 采用光线追迹结合反向蒙特卡洛法计算获得了其不同探测角度下中长波红外的辐射强度。同时基于侧迎头辐射强度计算结果, 对海洋环境降雨、海雾等特殊条件下中长波探测差异进行了对比分析, 并且通过实际外场复杂海背景下弱小目标探测试验等手段, 获取了不同距离下中长波探测数据, 统计分析了目标与海背景的等效温差变化。通过上述工作统计分析了中波和长波波段在不同气候海背景条件下的优势和劣势, 充分验证了中长波复合探测技术的优势。

**关键词:** 水面飞行器; 中长波红外; 高温高湿; 作用距离

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220807

## 0 引言

现役或在研低空掠海面飞行器正进一步采用隐身技术来提高突防能力, 红外中波辐射尤其在迎头探测角度下大为下降, 给舰载末端防空带来了越来越大的挑战。而且海背景干扰及新一代飞行器隐身能力会影响红外成像探测系统对目标的探测、跟踪性能, 为此需寻找有效的措施提高红外成像探测系统自身的灵敏度和抗干扰<sup>[1-3]</sup>性能。中长波复合探测技术利用目标辐射两种波段不同的特点, 增加探测系统在同一时刻对目标不同辐射能量区域的探测能力, 结合两者优势探测目标的尾焰和蒙皮辐射, 此外, 针对背景辐射、红外隐身材料在不同波段范围内红外辐射系数的差异, 双波段成像探测技术还具有较强的识别干扰和对抗隐身的能力。

文中对某低特征飞行器目标开展中长波红外辐射特性计算, 分析海雾、降雨等条件下中长波探测系统对其的作用距离差异, 同时进行外场复杂海背景下, 中长波抗海背景能力对比测试, 完成中长波复合探测技术优势论证。

## 1 某水面飞行器建模仿真及红外辐射计算

### 1.1 某水面飞行器三维物理模型

根据公开资料查阅相关文献, 获得某水面飞行器的结构物理参数和飞行状态参数, 采用商用建模软件<sup>[4-7]</sup>, 构建飞行器三维物理模型, 主要由本体与喷管组成, 如图 1 所示。

### 1.2 流场特性计算

#### 1) 计算模型和计算域

因为飞行器是轴对称结构, 所以数值计算时取物理模型的一半作为计算模型, 同时流场计算域是飞行器直径 1.5 倍, 长度为直径 4 倍。

#### 2) 网格划分

使用商用网格划分软件对计算模型进行网格划分, 如图 2 所示, 在机体壁面添加了附面层, 喷管尾后区域进行了局部网格加密处理, 并经过了网格独立性验证, 网格量为 420 万。

#### 3) 边界条件

依据某飞行器流场计算条件, 进行典型边界条件设置, 包括燃气总压  $P_t$ 、总温  $T_t$ 、环境压力  $P_a$ 、温度  $T_a$  典型值设置。

收稿日期: 2022-11-07; 修订日期: 2023-06-21

作者简介: 宋敏敏, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事仿真测试技术方面的研究。

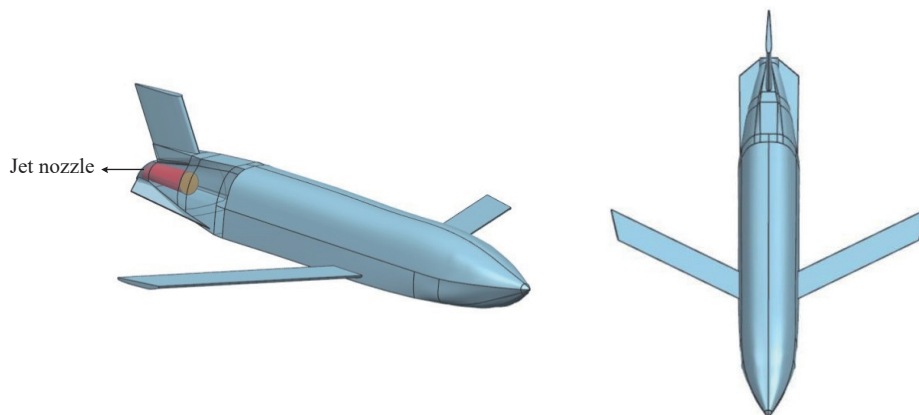
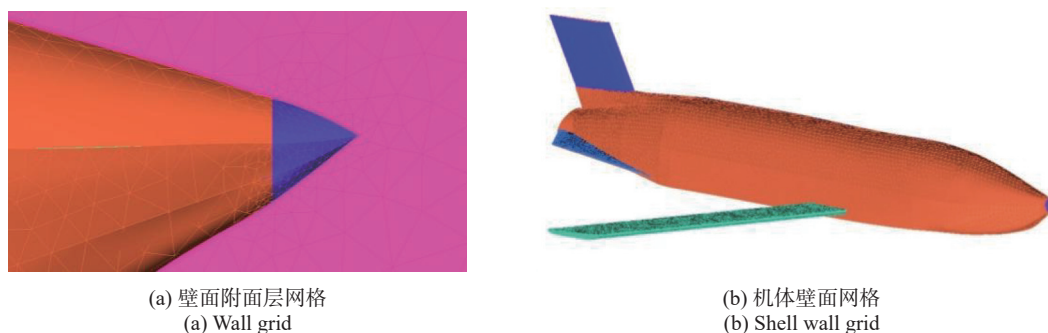


图 1 某飞行器三维物理模型

Fig.1 3D physical model of aircraft



(a) 壁面附面层网格  
(a) Wall grid

(b) 机体壁面网格  
(b) Shell wall grid

图 2 网格划分

Fig.2 Grid dividing

#### 4) 温度场分布

某飞行器机体和尾喷流的温度分布<sup>[8]</sup>如图 3 所示。可以看出,飞行器在飞行过程中主要高温集中在尾喷管壁面和尾喷流区域,喷管壁面和尾喷流温度最高,尾喷流高温核心区集中在喷管轴线附件,喷流温度沿轴向和径向逐渐降低,向四周扩散范围不大。由于气动热作用,机体温度略高于环境温度。

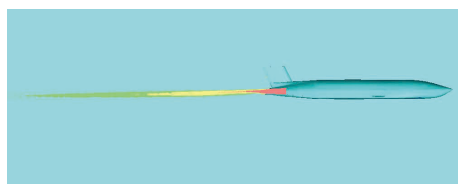


图 3 飞行器温度分布

Fig.3 Temperature distribution of aircraft

### 1.3 红外辐射计算

某飞行器目标的红外辐射主要来自蒙皮、喷口及尾焰辐射等 3 个方面。文中基于飞行器(包括蒙皮、喷口)以及尾焰温度场耦合传热机理,采用数值方法

分析飞行器外的气动对流换热和热传导,采用光线追踪<sup>[9-11]</sup>的方法计算飞行器的红外辐射特征。

#### 1.3.1 辐射亮度计算

通过温度场仿真结果,其飞行器表面和尾焰网格划分单元对外发射携带一定辐射能量的光线,并且沿某特定的方向余弦进行能量的传递,即蒙皮以及尾焰辐射亮度计算原理如下:

##### (1) 蒙皮辐射亮度

基于普朗克公式,每一束温度  $T$  的光线的辐射出射度与波数  $\omega$  关系为:

$$W_{bb,\omega,T} = \frac{\varepsilon C_1 \omega^5}{\exp(C_2 \omega/T) - 1} \quad (1)$$

式中:  $C_1$  为第一辐射常数;  $C_2$  为第二辐射常数;  $\varepsilon$  为发射率;  $\omega$  为波数(单位  $\text{cm}^{-1}$ )。

令波数间隔  $\Delta w$  为 15, 计算得到蒙皮在对应波段  $[w_1, w_2]$  视线方向上的红外辐射亮度为:

$$L = \frac{1}{\pi} \sum_{w_1}^{w_2} [W_{bb,\omega,T_m}] \Delta w \quad (2)$$

(2) 尾焰辐射亮度

气体辐射为选择性辐射,其辐射传输特性一般通过光谱表达。文中采用布格尔定律 (Bouguer Law) 表达辐射能量在介质中的传输,主要表征辐射能量变化,即在介质传输中,由于介质的吸收以及散射,能量逐渐衰减。假设一束射线(光谱辐射亮度为  $L_\lambda$ ) 垂直穿过厚度为  $dx$  的介质,见图 4。基于布格尔定律,在原射线方向上的辐射能的衰减量  $dL_\lambda$  正比于入射量以及厚度  $dx$ ,即:

$$dL_\lambda = -\beta_\lambda(x)L_\lambda dx \quad (3)$$

式中:  $\beta_\lambda$  为空间位置的函数,为光谱衰减系数,单位为  $m^{-1}$ ,负号表示减少。

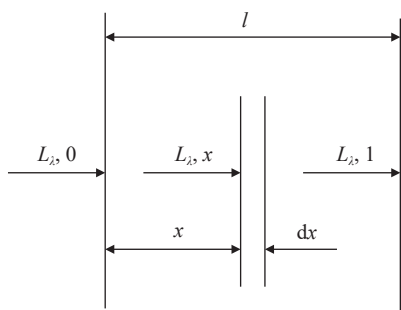


图 4 布格尔定律

Fig.4 Bouguer law

如图 4 所示:辐射能量按照指数衰减,其中光谱衰减系数  $\beta_\lambda$  是由光谱吸收系数  $k_\lambda$  和光谱散射系数  $\sigma_{s\lambda}$  两部分组成。

假设大气环境稳定,同时不考虑散射影响,此时可令光谱散射系数  $\sigma_{s\lambda}$  为 0,即  $\beta_\lambda(x)=k_\lambda(x)$ ,则:

$$L_{\lambda,l} = L_{\lambda,0} \exp\left[-\int_0^l \beta_\lambda(x) dx\right] = L_{\lambda,0} \exp\left[-\int_0^l k_\lambda(x) dx\right] \quad (4)$$

将某方向尾焰部分分为组分压强和温度均匀的层,每层的温度为  $T_m$ ,几何厚度为  $L_m$ ,组分压强为  $P_m(m=1,2,3\cdots)$ ;同时,计算各组分在每层中的光学厚度  $U_m$ 为:

$$U(\omega) = \rho L = p \left(\frac{273}{T}\right) L \quad (5)$$

式中:  $L$  为介质中的路径长度;  $\rho = p \left(\frac{273}{T}\right)$ 。

然后采用线性插值法,计算特定波数的光谱吸收系数  $K_{(m,\omega)}$ ,最后可计算得到每层的光谱透射率  $(\tau)_{m,\omega}$

$$(\tau)_{m,\omega} = \exp[-(K \cdot U)_{m,\omega}] \quad (6)$$

即每层的光谱辐射亮度为:

$$W_{m,\omega} = -W_{bb,\omega,T_m} \cdot [(\tau)_{m,\omega} - (\tau)_{m-1,\omega}] \quad (7)$$

最后可以计算得到尾焰在给定波段  $[w_1, w_2]$  上的红外辐射亮度为:

$$L = \frac{1}{\pi} \sum_{w_1}^{w_2} \left[ \sum_{i=1}^n W_{m,\omega} \right] \Delta w \quad (8)$$

1.3.2 辐射强度计算

首先计算辐射照度,辐射照度为单位面积上能获取的辐射通量。基于划分的网格,将蒙皮和尾焰划分成  $N$  个辐射微元,每个辐射微元向球体空间辐射能量,依据光线追迹与反向蒙特卡洛法<sup>[12]</sup>,计算在探测系统所张立体角  $\Omega$  内接受到的辐射源能量,辐射微元面在被照微元面上产生的总辐射照度  $H$  由其对被照微元所张的立体角  $\Omega$  与发射微元面的辐射亮度  $L_b$  以及被照微元面与连线夹角  $\theta$  的余弦三者的乘积,即:

$$H = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\sum_{i=1}^N L_b(\lambda, T_i) \cos \theta_i}{N} d\lambda \int_{\Omega} d\Omega \quad (9)$$

式中:  $T_i$  为第  $i$  个辐射微元温度;  $\theta_i$  为第  $i$  条追迹射线与探测系统面元法线夹角。

当探测系统与辐射微元面距离  $d$  足够远时,可以近似认为光线以垂直方向进入探测器面元,即  $\cos \theta \approx 1$ ,则目标在探测器处的辐射强度  $I$  为:

$$I = H \times d^2 = \frac{\Omega d^2}{\pi N} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sum_{i=1}^N E_b(\lambda, T_i) d\lambda \quad (10)$$

式中:  $E_b(\lambda, T_i)$  为黑体辐射出射度。

将探测波段划分为等带宽  $\Delta\lambda$  的  $n$  等份,这样在每个波段内辐射微元的黑体辐射以及蒙皮壁面的吸、反射特性和尾焰吸收、穿透特性均可视为常数,则上式改为:

$$I = \frac{\Delta\lambda \Omega d^2}{\pi N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n E_b(\lambda_j, T_{i,j}) \quad (11)$$

根据上式可以看出,在通过使用光线追迹法计算目标辐射强度时,可以一次性判断每条辐射射线在各个波段上是否被吸收,而不用再考虑射线反向推进过程,节省了判断射线与计算域中哪个辐射微元有交点的计算过程,从而在保证计算精度的情况下有效提高了仿真计算效率。

1.3.3 中长波红外辐射强度计算结果

综上所述,某飞行器在速度  $0.7 Ma$ ,  $10 m$  掠海飞

行状态下中波 3~5 μm, 长波 8~12 μm 波段各个探测角度归一化辐射强度计算结果如下图所示, 图 5 表示飞行器平面 360°辐射强度分布情况, 0°表示飞行器正尾

后, 90°表示飞行器的左侧, 180°表示飞行器的正前方, 270°表示飞行器的右侧。

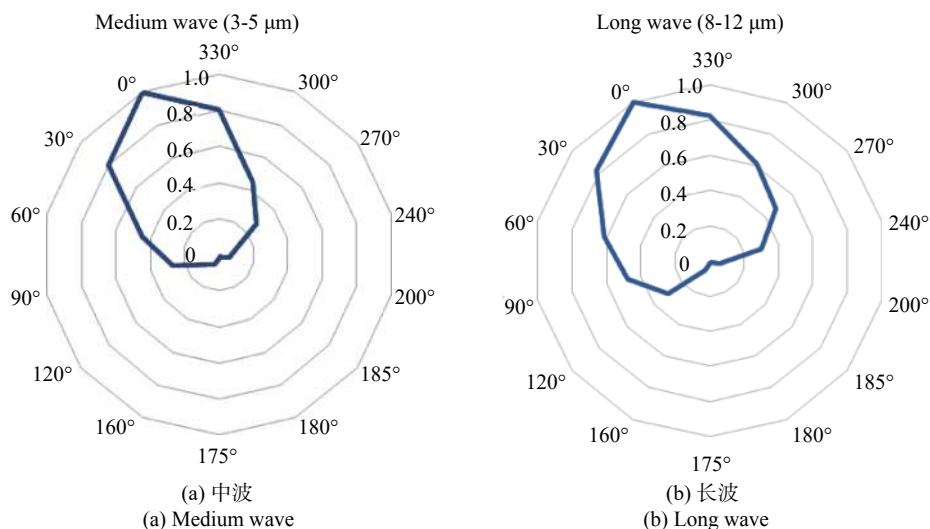


图 5 飞行器不同角度红外辐射分布

Fig.5 Aircraft infrared radiation distribution at different angles

如图 5 所示, 某飞行器中波和长波在 0°正尾后辐射最强, 180°迎头辐射强度最弱。

## 2 复杂海环境下中长波探测差异

海上湿度大且气候复杂多变, 雾霾、阴雨等天气过程变化频繁, 这会大大影响红外探测飞行器的探测识别能力。为此, 需要分析复杂海环境下中长波红外弱小目标探测以及抗海杂波能力, 论证中长波复合探测技术海环境下使用优势。

### 2.1 大气传输效应对中长波探测的影响

红外辐射在大气传输过程<sup>[13]</sup>中受到能见度、温度、相对湿度等条件的影响, 能见度越低、温度越高、湿度越大等情况可能导致导引头在特定环境下最大作用距离指标下降, 或是对于捕获的目标成像不清晰, 对于弱小目标无法在探测指标范围内识别。为此, 基于 MODTRAN 大气计算软件分析中长波导引头在如南海海雾环境、能见度变化大情况下的探测差异。在实验室内, 通过点源黑体加衰减片的测试方式分别获取中长波红外导引头灵敏阈值, 同时作用距离计算公式如下:

$$L = \left[ \frac{I \times \tau_a(njd, J)}{NEFD \times V_s / V_n} \right]^{1/2} \quad (12)$$

式中:  $NEFD$  为等效噪声辐射通量密度;  $V_s / V_n$  为信噪

比;  $\tau_a$  为透过率;  $njd$  为大气环境能见度 (单位 km);  $J$  为降雨量 (单位 mm/hr);  $I$  为辐射强度。

舰载末端防空拦截飞行器目标主要是在侧迎头方向, 为此选取 175°进入角进行中长波探测差异分析, 由图 5 可以得到飞行器此时的辐射强度。同时以某中长波红外探测系统为例, 分析复杂海洋环境对中长波探测的影响, 其中某中波探测系统灵敏阈  $NEFD \times V_s / V_n$  为  $1.29 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2$ , 某长波探测系统灵敏阈为  $1.73 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2$ 。下面具体分析海雾、降雨天气情况对中长波探测的影响。

大气传输特性主要由散射和吸收组成, 能见度  $njd$  的大小代表了大气散射强弱, 而海雾影响一般用能见度进行表征。文中为红外波段分析情况, 大气散射主要为米氏散射, 即纯因为散射引起的大气透过率公式为:

$$\tau_s(\lambda) = e^{-\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{3.91}{njd} \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^q d\lambda \times L} \quad (13)$$

式中:  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为计算的波长范围;  $L$  为距离;  $\lambda_0 = 0.55 \mu\text{m}$ ;  $q$  为散射系数, 能见度越好  $q$  越大。

南海夏季气候, 分析不同能见度海雾情况对于中长波探测的影响, 如图 6 所示, 无雨情况随着能见度变化, 中长波大气透过率会相应变化, 由公式 (12) 可

以计算出中长波作用距离差异。能见度 2 km 是中长波探测能力的分界点, 大于 2 km 长波探测优于中波, 反之中波探测较优。

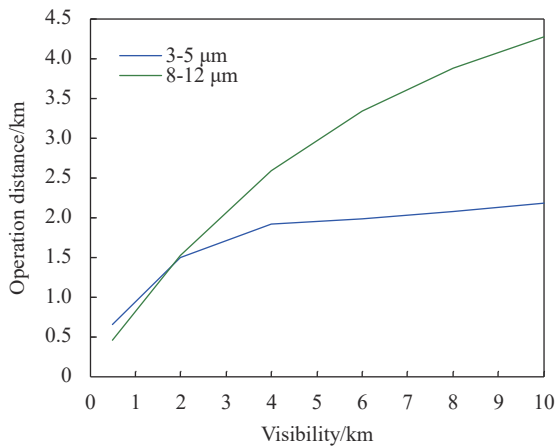


图 6 作用距离随能见度变化

Fig.6 Operation range varies with visibility

同时, 降雨也同样影响红外探测, 使用 24 h 平均降雨量  $J$  表征降雨程度。即纯因为降雨引起的大气透过率公式<sup>[14]</sup>:

$$\tau_J(\lambda) = e^{-0.66J^{0.66} \times L} \quad (14)$$

式中:  $J$  为降雨量, 单位 2.5 mm/h。

文中主要分析小雨情况 (雨量不大于 2.5 mm/h) 条件, 而且下雨情况下能见度一般较差, 为此选用 2 km 能见度, 即计算 2 km 能见度、不同降雨量下透过率变化, 同理由公式 (12) 可以计算出中长波作用距离差异。具体结果如图 7 所示, 下雨对长波探测影响

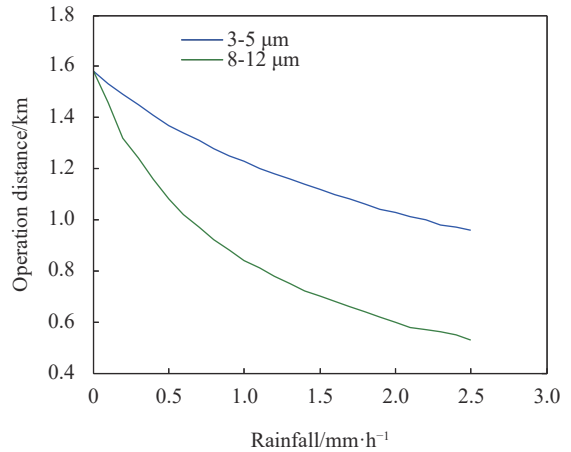


图 7 作用距离随雨量变化

Fig.7 Operation range varies with rainfall

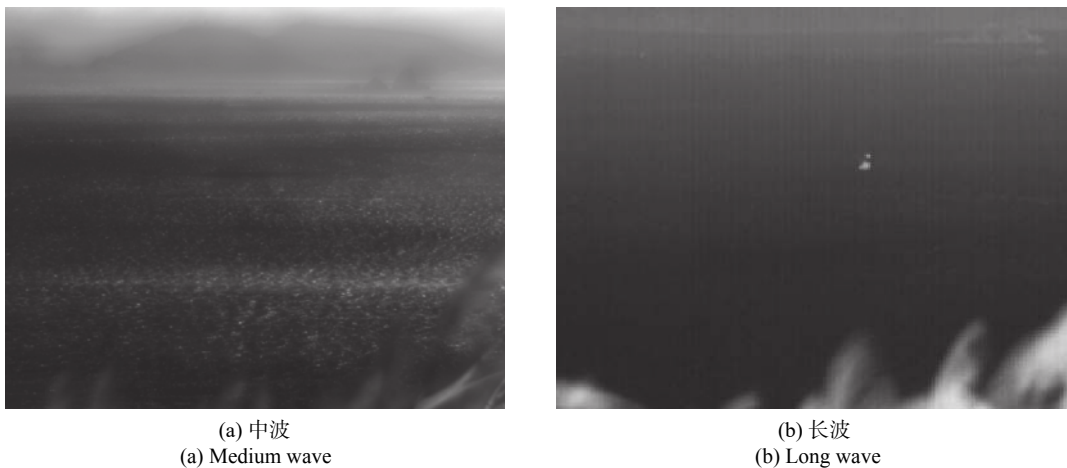
较大, 在有雾有雨条件下, 中波探测较优于长波。

### 2.2 海杂波对中长波探测的影响

海洋环境下受到日照影响, 在一定探测角度下海面呈现“亮带”、“鱼鳞光”等景象。因为太阳辐射靠近中短波, 为此长波探测对海面背景干扰具备天然的压制作用。针对海洋环境迎攻条件低特征水面飞行器中长波探测验证需要, 通过船目标替代水面飞行器开展外场验证, 因为主要考虑飞行器蒙皮辐射, 而船体中长波辐射强度数值与飞行器侧迎头方向相近。

试验条件如下: 试验地点为东海海域, 测试设备为中波红外热像仪和长波红外热像仪各一台。在中午太阳辐射背景下, 两台热像仪同时对海上船目标进行采集。

采集结果如图 8 所示: 此时中波探测受到太阳辐



(a) 中波  
(a) Medium wave

(b) 长波  
(b) Long wave

图 8 中长波海杂波影响差异

Fig.8 Difference of medium and long wave sea clutter influence

射影响, 船目标淹没在海亮带杂波干扰中, 已经无法识别目标, 而长波探测能清晰看到船只, 抗海杂波性能明显优于中波。

图 8 中, 对采集得到的中长波海杂波数据进行温

度均方差值分析, 计算得到长波海杂波的均方差值为 0.4 K, 而中波海杂波的均方差值为 1.9 K, 同时统计了不同距离长波探测下目标与背景温差情况 (中波探测下已经无法识别目标), 如表 1 所示。

表 1 海杂波情况下不同距离目标与背景温差统计

Tab.1 Statistics of temperature difference between targets and background at different distances in the case of sea clutter

| Distance/km | Band/ $\mu\text{m}$ | Target equivalent temperature/K | Sea background temperature/K | Temperature difference between target and background/K |
|-------------|---------------------|---------------------------------|------------------------------|--|
| 1           |                     | 319.1                           | 302.5                        | 16.6   |
| 2           |                     | 313                             | 303.4                        | 9.6  |
| 3           |                     | 310                             | 304.1                        | 5.9  |
| 4           | 8-12                | 308.7                           | 304.1                        | 4.6  |
| 5           |                     | 308.2                           | 304.8                        | 3.4  |
| 6           |                     | 307.6                           | 304.5                        | 3.1  |

表 1 中, 复杂海背景情况下长波对弱小目标探测具备优势, 距离大于 6 km 情况下目标与背景等效温差仍然大于 3 K。

### 3 结 论

文中基于 CFD 流体仿真软件对某反舰飞行器目标进行了仿真, 获取了其在亚音速巡航状态下的温度场分布; 通过光线追迹方法, 数值上模拟计算出不同探测角度下的水面飞行器的红外辐射特性。最后分析了复杂海背景下的中长波探测差异, 具体结论如下: 在晴朗天气、能见度较好情况下, 长波探测在弱小目标识别以及抗海杂波干扰具备优势, 但是一旦是海雾、降雨条件、能见度较差情况下中波探测优于长波, 为此, 需要采用中长波复合探测的方式取长补短, 提升各种海环境条件下弱小目标识别概率。

#### 参考文献:

[1] Zang Haifei, Liu Li, Tian Yi, et al. The realization forms and development for radiofrequency/optics compound guidance [J]. *Flight Control & Detection*, 2020, 3(3): 16-23. (in Chinese)

[2] Li Jianxun, Tong Zhongxiang, Fan Xiaoguang, et al. Research of an effectiveness evaluation method of infraed countermeasure process [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0304008. (in Chinese)

[3] Yang Dong, Gao Deliang, Cao Yaoxin, et al. Study on anti-

jamming technology of IR seeker [J]. *Flight Control & Detection*, 2020, 3(3): 80-85. (in Chinese)

[4] Zhang Faqiang, Fan Xiang, Cao Cuijiao, et al. Research of the infrared radiation characteristic of cruise missile [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(11): 1229-1233. (in Chinese)

[5] Zhang Xiaoying, Zhu Dingqiang. Quasi-three dimensional calculation of missile wall temperature and infrared radiation of the missile [J]. *Missile and Space Vehcile*, 2006, 5(4): 42-47. (in Chinese)

[6] Shan Yong, Zhang Jingzhou, Guo Rongwei. Numerical computation and analysis of the infrared radiation characteristic of missile scarfskin [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 2(2): 251-255. (in Chinese)

[7] Liu Linhua. Backward Monte Carlo method based on radiation distribution factor [J]. *AIAA Journal of Thermo Physics and Heat Transfer*, 2004, 18(1): 151-153.

[8] Lv Jianwei, Wang Qiang. Numerical calculation and analysis of infrared radiation characteristics from aircraft skin by using RMC method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 232-237. (in Chinese)

[9] Guo Juguang, Ma Yonghui. Radiometric transmission method between internal and external based on differential ray tracing [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2017, 15(3): 35-38. (in Chinese)

[10] Ding Xuanhao, Cai Ruhua. Numerical solution of the ray equation and the ray track [J]. *Journal of Southwest China Normal University*, 2005, 30(4): 667-671. (in Chinese)

- [11] Wang Runxuan. A new method of RAY tracing in GRIN Optics [J]. *Physical and Engineering*, 2003, 13(2): 25-27. (in Chinese)
- [12] Modest M F. Backward Monte Carlo simulations in radiative heat transfer [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2003, 125(1): 57-62.
- [13] Li Fei, Wang Duo. Research on impact of atmospheric transmission on infrared seeker performance [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2019, 30(1): 21-24. (in Chinese)
- [14] Zhou Guo, Liu Xiangwei, Xu Jiwei. A math model of calculate the atmospheric transmittance of infrared radiation [J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(6): 331-334. (in Chinese)

## Research on long wave detection of low feature surface aircraft in sea environment

Song Minmin<sup>1,2</sup>, Lv Tao<sup>1</sup>, Sang Xueyi<sup>1,2</sup>, Xue Fenfen<sup>1,2</sup>, Su Jianping<sup>1</sup>

(1. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2. Infrared Detection Technology Research & Development of CASC, Shanghai 201109, China)

### Abstract:

**Objective** Most of the new generation of surface aircraft further use stealth, power control and other means to improve their penetration ability, and their infrared radiation energy has dropped significantly, bringing more and more challenges to shipborne air defense. The medium and long wave dual-band infrared detection method effectively utilizes the different characteristics of the target radiation in the two bands to enhance the detection ability of different radiation energy areas of the surface aircraft with low characteristics at the same time.

**Methods** The infrared radiation model of an surface aircraft at different detection angles is established by using ray tracing and inverse Monte Carlo method, and the medium-long wave infrared radiation intensity of an surface aircraft at different detection angles is completed. Then, based on the calculation results of side-to-head radiation intensity, the differences of medium-long wave detection under special conditions such as rain and sea fog in the marine environment are compared and analyzed, and the medium-long wave detection data at different distances are obtained by means of the detection test of weak and small targets under the complex sea background in the actual outfield, and the equivalent temperature difference between the target and the sea background is statistically analyzed.

**Results and Discussions** The calculation results of medium and long wave infrared radiation intensity distribution of an surface aircraft at different detection angles are shown in Figure 5; The impact of sea haze, overcast rain and other weather on medium-long wave detection is shown in Figure 6 and Figure 7 respectively; The influence of sea clutter on medium and long wave detection is shown in Figure 8 and Table 2. Through the above work, the advantages and disadvantages of medium-wave and long-wave bands under different climate and sea background conditions are statistically analyzed, and the advantages of medium-wave and long-wave composite detection technology are fully verified.

**Conclusions** In sunny weather and good visibility, long-wave detection has advantages in weak and small target recognition and anti-sea clutter interference. However, in case of sea fog, rainfall conditions and poor visibility, medium-wave detection is superior to long-wave detection. Therefore, it is necessary to use the medium-long wave composite detection method to learn from each other's strong points and compensate for the weak and small target recognition probability under various sea environment conditions.

**Key words:** surface aircraft; medium and long wave; high temperature and high humidity; operation range