

机载红外搜索跟踪系统有效探测区域研究

王芳, 罗寰, 王海晏, 寇添, 寇人可
(空军工程大学航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:针对机载红外搜索跟踪(IRST)系统在实际空战中发现概率过低的问题,论文尝试将作用距离与发现概率相结合,提出了有效探测区域的概念,并分别建立了水平、俯仰两种探测方式下有效探测区域模型;接着讨论了在复杂作战环境下,所建立的模型随发现概率、作用距离、大气透过率、目标飞行速度的变化情况。仿真结果表明,探测区域范围是随着上四种因素的变化而实时变化的,并且在两机相距百公里以上,气象恶劣、目标低速飞行时,有效探测区域仅仅是目标尾后上方很小的一块区域。机载IRST系统可以依据论文给出的变化关系,在探测过程中,动态建立信号视场中检测阈值与复杂因素的函数关系,以提高发现概率。论文为充分发挥机载IRST系统的作战使用性能提供了理论参考。

关键词:红外探测;有效探测区域;复杂环境;探测概率

中图分类号:TN929.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.05.009

Research on effective detection area of airborne infrared search and tracking system

WANG Fang, LUO Huan, WANG Hai-yan, KOU Tian, KOU Ren-ke

(Aeronautics and Astronautics Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Aiming at the low detection probability of airborne infrared search tracking system in combat, a conception of effective detection area is put forward and the models of effective detection area are built in level and pitching angle. Then, the changes of the model with detection probability, operating range, atmospheric transmittance and flight speed are discussed. The simulation results show that the detection area changes with these four factors in real-time, and when the operating range exceeds one hundred kilometers, the weather is bad and flight speed is low, the effective detection area is only a small area above the end of the target. According to the change rule in the paper, the airborne infrared search and tracking system can improve the detection probability through establishing dynamically the function relationship between detection threshold and complex factors. This study provides a theoretical reference for the operational performance of the airborne infrared search and tracking system.

Key words: infrared detection; effective detection area; complex factors; detection probability

1 引言

机载红外搜索跟踪(IRST)系统是随着红外技术发展起来的挂载在飞机上的光电设备,与传统雷达探测相比,其优点是测量精度高,抗干扰能力强。

对于机载IRST系统综合性能的研究,目前大多数集中在其作用距离上,文献[1]~[4]对其静态作用距离模型进行了理论研究,考虑了目标特性、复杂背景环境、大气衰减、基于目标辐射的信噪比等因素

作者简介:王芳(1982-),女,讲师,研究生,主要从事机载光电探测与光电系统作战试验与评估等方面研究。E-mail: sase.ly@163.com

收稿日期:2017-09-27; **修订日期:**2017-11-25

对作用距离的影响。寇添等人引入作战环境,对静态模型在实时性和动态性方面作了扩展研究^[5-6]。然而仅仅考虑作用距离指标,并不能使系统达到最好的探测效果,甚至飞行员还会发现随着作用距离的增加,系统发现概率有下降的现象。

本文在已有理论研究成果的基础上,试图将作用距离与发现概率联合起来考虑,提出有效探测区域的概念,试分析有效探测区域与作用距离、发现概率、战场环境、飞行速度的制约关系。本文的研究拟对机载IRST的实战应用提供有意义的参考价值。

2 有效探测区域模型建立

本文所指的有效探测区域,并不是机载IRST性能指标中所给出的系统搜索范围。这里有效探测区域定义为:以载机为中心,机载IRST系统在任意作用距离处,以不低于作战要求的发现概率发现目标的探测空域。

假设两机态势如图1所示,建立载机飞机坐标系 $Oxyz$, P 点为目标在 XOY 平面的投影点, α 表示目标相对于载机的方位角, β 表示目标相对于载机的俯仰角。有效探测区域标记为 $\Omega(\alpha, \beta)$,是由方位角、俯仰角共同确定的一个空间区域。

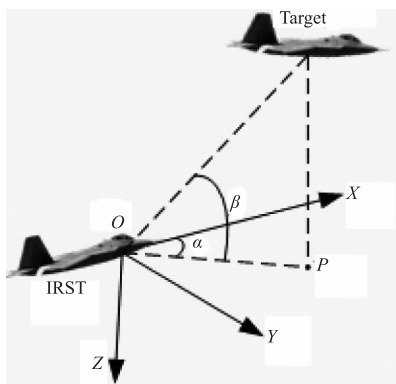


图1 有效探测区域示意图

Fig. 1 Diagram of effective detection area

机载IRST系统是通过感知目标的红外辐射强度信息完成搜索跟踪功能。两机方位角、俯仰角不同,探测到目标的辐射强度就不同,根据传统作用距离公式^[7],机载IRST的作用距离就不同,从而可以分析出有效探测区域是随着作用距离的变化而变化的一个量。

假设载机与目标机处于同高度层,以图2所示的尾追探测情况为例建立作用距离与方位角之间的关系函数。

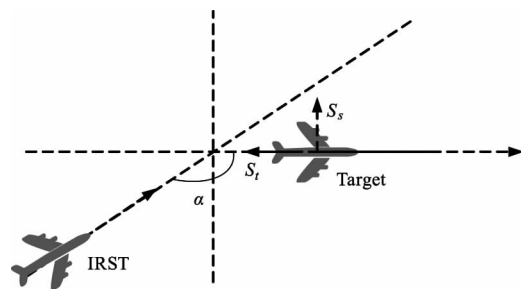


图2 水平尾追探测态势图

Fig. 2 The situation diagram of detection in level direction

图2中 α 表示两机方位角。目标机静止状态下的侧面积用 S_s 表示,尾后面积用 S_t 表示。可以算出此态势下,目标在机载IRST方向的辐射强度为:

$$I_t = \frac{M_t}{\pi} S_t \cos \alpha - \frac{M_s}{\pi} S_s \sin \alpha \quad (1)$$

式中, M_t 为目标尾后方的辐射出射度,主要与目标尾喷口的温度及废气尾焰温度有关。 M_s 为目标侧面的辐射出射度,其大小主要受飞机蒙皮温度的影响。

用式(1)对传统作用距离方程进行修正,整理后可得方位角与作用距离关系式为:

$$\begin{cases} \alpha = \arcsin \frac{(R^2 C)^2}{D^2 + B^2} - \tan \frac{B}{D} \\ C = \frac{\text{SNR} \cdot \sqrt{A_d \cdot \Delta f}}{A_o \cdot D^* \cdot \tau_\alpha \cdot \tau_o} \\ B = \frac{M_s S_s}{\pi} \\ D = \frac{M_t S_t}{\pi} \end{cases} \quad (2)$$

式中, R 为两机作用距离; A_o 为探测器前光学系统的通光面积; A_d 为探测器光敏面积; Δf 为探测系统的等效噪声带宽;SNR为探测器接收到的信号噪声比; τ_α 为大气透过率; D^* 为探测器的比探测率; τ_o 标记光学系统透过率。

当目标与载机处于不同高度层时,其探测态势假设如图3所示, β 表示两机俯仰角。

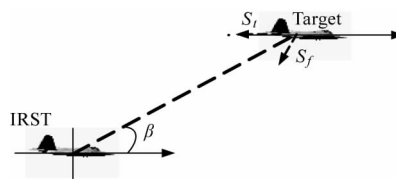


图3 俯仰尾追探测两机态势图

Fig. 3 The situation diagram of detection in pitching direction

同样可以推导出目标在IRST方向的辐射强度:

$$I = \frac{M_t}{\pi} S_t \cos \beta + \frac{M_s}{\pi} S_s \cos \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) \quad (3)$$

式中, S_f 表示目标俯视投影面积。同样用式(3)对传统作用距离方程进行修正, 可得俯仰角与作用距离关系式为:

$$\begin{cases} \beta = \arccos \frac{(R^2 C)^2}{D^2 + B^2} - \tan \frac{D}{B} \\ C = \frac{\text{SNR} \cdot \sqrt{A_d \cdot \Delta f}}{A_o \cdot D^* \cdot \tau_\alpha \cdot \tau_o} \\ B = \frac{M_s S_f}{\pi} \\ D = \frac{M_t S_t}{\pi} \end{cases} \quad (4)$$

从式(2)、(4)可以看出, 在IRST的性能参数、目标机机型都已确定的情况下, 影响有效探测区域的可变因素有: R 、 SNR 、 τ_α 、 M_s 、 M_t 。

3 作战环境下有效探测区域分析

3.1 发现概率影响分析

依据有效探测区域的定义, 发现概率的选取影响有效探测区域的取值范围。机载IRST系统的发现概率为检测视场中信号超过检测阈值的概率。对于点目标信号探测系统, 由于受背景辐射不确定性、系统噪声等随机因素的影响, 其发现目标是概率事件。表达式为:

$$P_d = \int_{\text{TNR}-\text{SNR}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (5)$$

式中, TNR 为阈噪比; SNR 为信噪比, 发现概率是对一个标准正态分布的概率密度函数的积分。

根据信噪比与作用距离的关系, 依据文献[8], 设置阈噪比为8, 图4仿真了作用距离与发现概率的变化情况。可以看出, 在机载IRST探测距离指标内, 随着作用距离的增大, 发现概率迅速减小, 说明一味增加作用距离, IIRST并不能达到最佳的探测效果。

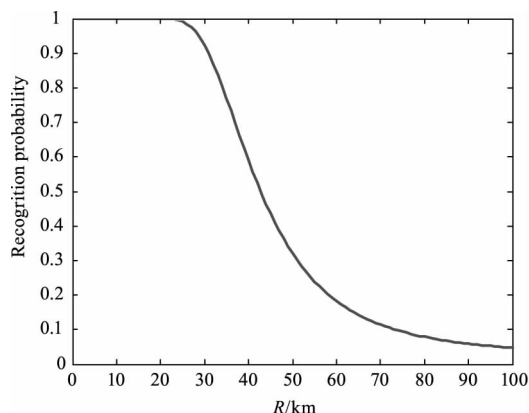


图4 作用距离与探测率的关系图

Fig. 4 The relationship of operating range and detection probability

依据公式(2)信噪比与方位角的关系式, 图5仿真了水平探测时, 探测概率随方位角的变化情况,

设机头方向为0方向, 明显看出尾后方的探测概率要大于机头方向, 并且符合探测概率($P_d > 0.85$)的值在一定的角度范围内, 超过此角度范围, 探测概率迅速下降。

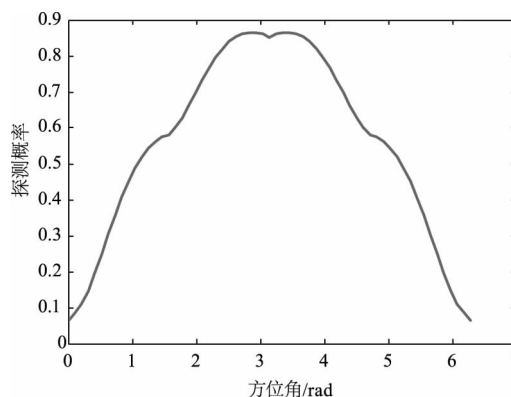


图5 方位角与探测率关系图

Fig. 5 The relationship of azimuth angle and detection probability

3.2 大气透过率影响分析

不同的气象条件下, 大气透过率不同, 机载IRST系统的探测距离就会相差很大, 有效探测区域也会不同。在俯视探测中, 处于不同高度层的大气对红外辐射衰减不同, 其大小与载机相对于目标的俯仰角 β 有关, 如图6所示。

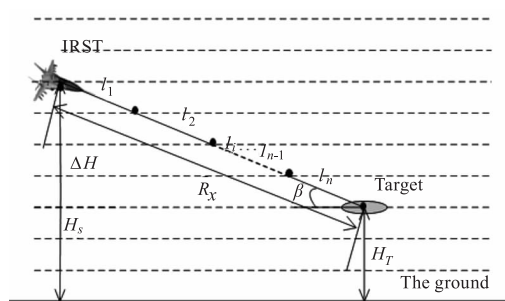


图6 斜程探测路径示意图

Fig. 6 The sketch map about slanted Detecting path

目标与载机之间的斜程 R_x 可等效换算为近地水平距离^[9]:

$$L(R_x) = \frac{\exp(-0.313H_s) - \exp(-0.313H_T)}{0.313\sin\beta} \quad (6)$$

式中, H_s 表示载机飞行高度; H_T 表示目标机所在高度。由此可得大气透过率:

$$\tau_\alpha(R_x) = \exp\left[-\mu_0 \cdot \frac{\exp(-0.313H_s) - \exp(-0.313H_T)}{0.313\sin\beta}\right] \quad (7)$$

式中, μ_0 为大气衰减系数, 说明大气透过率与俯仰角有关。

图7仿真了不同作用距离处,俯仰角与大气透过率关系,可以看出透过率随着俯仰角的增大刚开始增大的很快,达到某一值时趋于平缓。主要是由于随着俯仰角的增大,斜程作用距离缩短变缓,导致透率先急剧变化,后逐渐平缓。

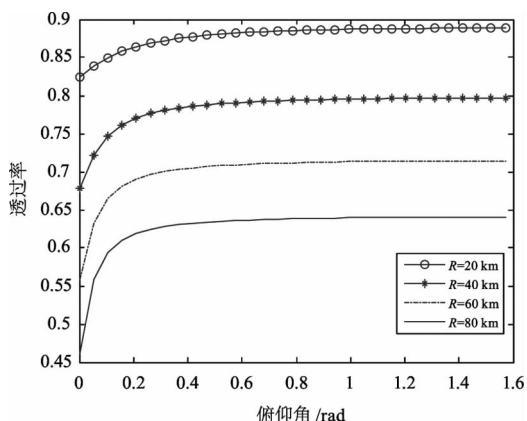


图7 俯仰角与探测率关系图

Fig. 7 The relationship about angle of pitch and transmittance

3.3 目标飞行速度影响分析

机载IRST系统有效探测区域与目标辐射强度息息相关,目标的辐射强度与飞行速度有关,实战过程中,目标的飞行速度实时变化,所以有效探测区域是个实时变化的量。

空中目标的红外辐射主要由发动机尾喷口辐射、废气尾焰辐射和气动加热引起的蒙皮辐射三部分组成。当目标速度 $V_t > 2 \text{ Ma}$ 时,气动加热产生的飞机蒙皮热辐射比较明显,尤其是飞机的前向和侧向辐射^[10]。其温度 T_s 为:

$$T_s = T_0 \left[1 + k \left(\frac{\gamma - 1}{2} \right) \text{Ma}^2 \right] \quad (10)$$

式中, T_s 为飞机蒙皮温度; T_0 为周围大气温度; k 为恢复系数,其取值决定于附面层中气流的流场,层流取0.82,紊流取0.87; γ 为空气的定压热容量和定容热容量之比,通常取1.3; Ma 为飞行马赫数。

将式(10)代入普朗克黑体辐射公式,可求得目标侧向的辐射出射度为:

$$M_s = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_s}} - 1} d\lambda \quad (11)$$

式中,第一辐射量 $C_1 = 3.741 \times 10^{-16} \text{ W/m}^2$; 第二辐射量 $C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$; $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 表示辐射波段。

图8反映了在方位角一定的情况下,马赫数与辐射强度的关系。可以看出当飞行速度 $V_t > 2 \text{ Ma}$ 时,蒙皮的红外辐射增强,由于目标辐射温度与马赫数的平方成正比关系,因此随着马赫数的增大,目标红外辐射强度急剧增强,相应的有效探测区域也会发生剧烈变化。

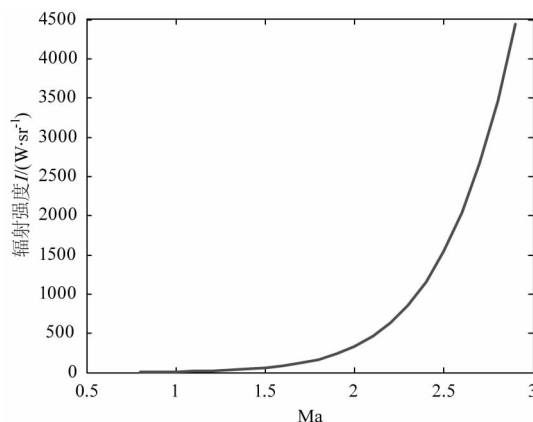


图8 马赫数与辐射强度关系图

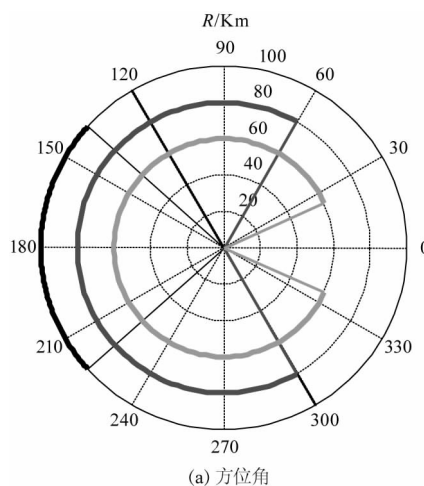
Fig. 8 The relationship about Mach number and radiation intensity

4 作战环境下,有效探测区域仿真分析

依据上述模型分析,本文拟仿真不同作战条件下有效探测区域变化情况,试探索其变化规律。

假设目标为某型战斗机,探测器的各性能参数为: $\Delta f = 10^3$; $A_0 = 0.015 \text{ m}^2$; $A_d = 2.25 \times 10^{-8} \text{ m}^2$; $D^* = 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}$; $\text{SNR} = 8 P_d > 0.8$ 。

目标飞行速度 $V_t > 2 \text{ Ma}$ 时,图9(a)、(b)分别反映了方位角 α 、俯仰角 β 随探测距离的变化情况。表1反映了60、80、100 km处有效探测区域的取值范围。



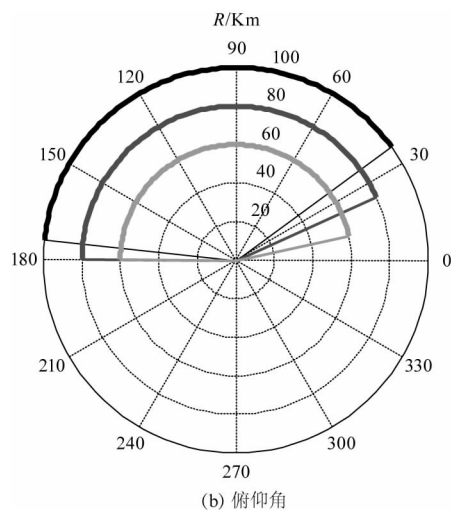


图9 有效探测区域与探测距离关系图

Fig. 9 The relationship of detection area and operating range

表1 不同作用距离处的有效探测区域

Tab. 1 Effective detection area in different range

R/km	60	80	100
$\alpha/(\circ)$	24 ~ 336	60 ~ 300	138 ~ 222
$\beta/(\circ)$	12 ~ 180	24 ~ 180	36 ~ 174

从图9可以看出,探测过程中要保证发现概率大于某一设定值,不同最大作用距离处的有效探测区域是不一样的。随着距离增大,有效探测区域明显减小。并且可以看出在作用距离 $R = 100$ km 处,俯仰有效探测区域并不包含目标正后方,这与文献[6]中最佳探测点的方位俯仰角论点相一致。

说明红外搜索跟踪系统在作战使用中,在载机与目标由远及近的飞行过程中,可以依据有效探测区域的选择范围,在保证虚警概率的前提下,合理设置信号检测阈值,使其由小到大渐变,有助于提高机载IRST的工作性能。

图10反映了大气透过率在0.9、0.7、0.5时探测区域的变化情况。

可以看出,大气透过率对有效探测区域的影响很大,随着透过率的减小,探测区域缩小得很快,当大气透过率 $\tau_0 < 0.6$ 时,有效探测区域仅在尾后方很小的角度范围内,说明在大气透过率较低的情况下,要较好地发挥机载IRST的探测性能,对载机的飞行要求较高。

图11仿真了目标飞行速度分别在 $V_t = 1$ Ma、

$V_t = 2$ Ma、 $V_t = 3$ Ma 时,有效探测区域变化情况。

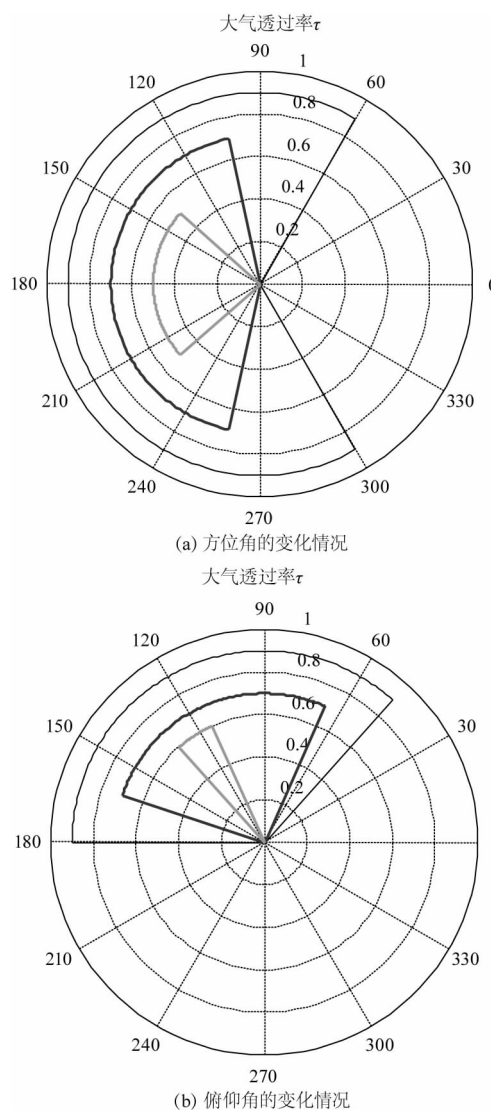
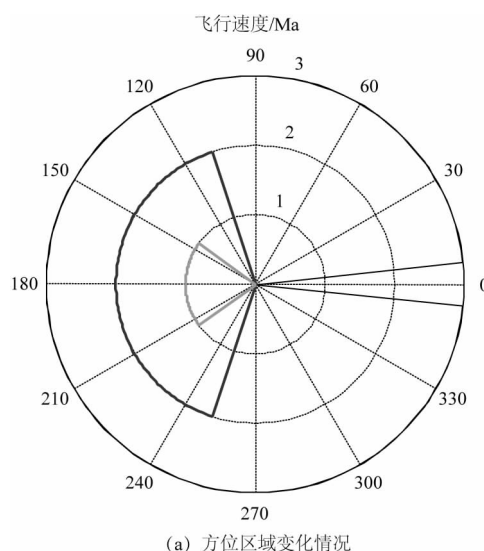


图10 有效探测区域与大气透过率关系图

Fig. 10 The relationship of detection area and transmittance



(a) 方位区域变化情况

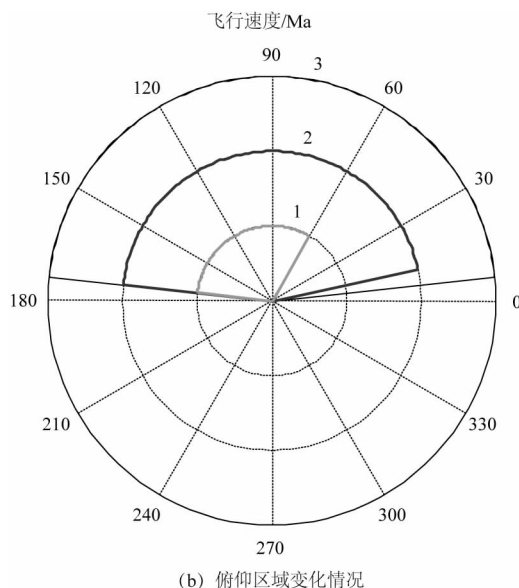


图11 有效探测区域与飞行速度关系图

Fig. 11 The relationship of effective detection area and flight speed

仿真表明,随着马赫数的增大,有效探测区域会迅速增大,在目标速度接近3 Ma时,几乎可以全向探测。主要原因在于蒙皮温度与马赫数的平方成正比关系,目标飞行越快,气动加热使蒙皮温度越高,越容易被探测到。然而在 $V_t < 1$ Ma的情况下,仅仅在尾后方 $\alpha(144 \sim 181)^\circ$ 、 $\beta(114 \sim 131)^\circ$ 范围内能探测到目标。

5 结论

为了更好地量化分析机载IRST探测性能,本文将作用距离与发现概率联合考虑,提出有效探测区域的概念,建立了水平、俯仰两种探测区域模型,讨论了发现概率、大气透过率和目标飞行速度等关键因素对有效探测区域的影响关系。

仿真结果表明,通过建立有效探测区域与目标距离、大气透过率、飞行速度的模型关系,可以实时计算得出机载IRST有效探测区域,从而为发挥机载IRST的作战使用性能提供理论参考。

参考文献:

- [1] WU Hanping. Operating distance equation for infrared point target detect system[J]. Infrared Technology, 2007, 29(6): 341 – 344. (in Chinese)
吴晗平. 红外点目标探测系统作用距离方程理论研究[J]. 红外技术, 2007, 29(6): 341 – 344.
- [2] 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 – 1435. (in Chinese)
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 – 1435.
- [3] FANG Yiqiang, FAN Xiang, CHEGNG Zhengdong, et al. Modeling and calculating the infrared radiance of sky[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(8): 896 – 902. (in Chinese)
方义强, 樊祥, 程正东, 等. 天空大气背景红外辐射建模与计算[J]. 激光与红外, 2013, 43(8): 896 – 902.
- [4] YI Yaxing, YAO Mei, WU Junhui, et al. Factors of the detected luminance of an infrared target[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(1): 13 – 18. (in Chinese)
易亚星, 姚梅, 吴军辉, 等. 影响红外目标探测亮度的因素[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 13 – 18.
- [5] WANG Lin, YU Lei, KOU Tian, et al. Research on optimum operating point and detection probability envelope of airborne IRST system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(5): 0504006. (in Chinese)
王领, 于雷, 寇添, 等. 机载IRST系统最佳工作点及探测概率包线研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 0504006.
- [6] KOU Tian, WANG Haiyan, WU Xueming, et al. Detection probability envelope of airborne photoelectric system in complex condition[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0304002. (in Chinese)
寇添, 王海晏, 吴学铭, 等. 复杂环境下机载光电系统探测概率包线研究[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0304002.
- [7] WANG Haiyan. The infrared radiation and application[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2014, 246 – 249. (in Chinese)
王海晏. 红外辐射及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014, 246 – 249.
- [8] Renke Kou, Haiyan Wang, Zhihe Zhao, et al. Optimum selection of detection point and threshold noise ratio of airborne infrared search and tracksystems[J]. Applied Optics, 2017, 56(18): 5268 – 5273.
- [9] LIU Hui. Infrared photoelectric detect principle[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2015. (in Chinese)
刘辉. 红外光电探测原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [10] WANG Ling, YU Lei, KOU Tian, et al. Evaluation and calibration of operational capability to airborne IRST system[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(5): 192 – 198. (in Chinese)
王领, 于雷, 寇添, 等. 机载红外搜索跟踪系统探测性能评测标定[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(5): 192 – 198.