

# 机载红外搜索跟踪系统的最佳阈噪比

寇人可, 王海晏, 吴学铭

空军工程大学航空航天工程学院, 陕西 西安 710038

**摘要** 为了探求机载红外搜索跟踪(IRST)系统的最佳阈噪比(TNR),采用基于信噪比(SNR)的作用距离模型,并结合虚警概率、发现概率和 SNR 之间的函数关系,构建了机载 IRST 系统的探测点目标概率模型,重点分析了发现概率与作用距离、目标速度和倾斜角度之间的关系。结合飞机的红外辐射特性,建立了机载 IRST 系统的探测概率数学模型,仿真分析了在不同 TNR 下,方位角和俯仰角的变化对作用距离的影响。根据作战需求,提出最佳 TNR 在 8~10 范围内。该研究结果为提高机载 IRST 系统在实际使用中的探测效率提供了参考依据。

**关键词** 探测器; 阈噪比; 作用距离; 发现概率; 虚警概率; 探测概率包线

**中图分类号** TN215      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0304001

## Optimum Threshold Noise Ratio of Airborne Infrared Search and Track System

Kou Renke, Wang Haiyan, Wu Xueming

*College of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University,  
Xi'an, Shaanxi 710038, China*

**Abstract** In order to find the optimum threshold noise ratio (TNR) of the airborne infrared search and track (IRST) system, the operating range model based on the signal to noise ratio (SNR) is adopted to combine with the function relationships of false alarm probability, recognition probability together with SNR and thus the probability model of detection point target of the airborne IRST system is established. The relationship between the recognition probability and the operating range, the target speed and the oblique angle is mainly analyzed. Combining with the infrared radiation characteristics of aircraft, the mathematical detection probability model of airborne IRST system is established. The influence of the change of target azimuth and pitching angle on the operating range is simulated and analyzed under different TNRs. According to operational requirements, it is concluded that the range of the optimum TNR is from 8 to 10. The results provide references for increasing the detection efficiency of airborne IRST system in practical applications.

**Key words** detectors; threshold noise ratio; operating range; recognition probability; false alarm probability; detection probability envelope

**OCIS codes** 040.3060; 040.1880

## 1 引 言

随着反无线电技术的成熟,传统的雷达探测已经不能完全满足实时作战的需求。红外被动探测技术具有抗干扰能力强、测量精度高以及作用距离远等优势,广泛应用于红外搜索跟踪(IRST)系统,该系统可代替雷达对目标进行探测。然而,复杂的战场环境导致发现概率过低、虚警概率过高,严重影响了作战效能。因此,在允许的虚警概率下,如何设置最佳的阈噪比(TNR)以得到更远的探测距离和更高的发现概率是亟需解决的问题之一。

目前,国内外已对机载 IRST 系统的探测概率进行了深入研究。祁蒙等<sup>[1-4]</sup>分析了探测概率、虚警概率

**收稿日期:** 2016-10-19; **收到修改稿日期:** 2016-11-08

**作者简介:** 寇人可(1992—),男,硕士研究生,主要从事光电探测与对抗研究方面的研究。E-mail: 365255860@qq.com

**导师简介:** 王海晏(1968—),男,博士,副教授,主要从事光电技术原理及应用方面的研究。E-mail: whh\_shx@sohu.com  
(通信联系人)

和信噪比(SNR)三者之间的关系。王领等<sup>[5-8]</sup>基于某一固定的 TNR 和虚警概率提出了机载IRST系统的最佳工作点及探测概率包线,但其具有一定的局限性。在实际应用中,为了达到最佳的探测效果,最佳 TNR 是变化的。本文基于现有的理论成果,结合不同大气环境、作战背景和任务需求,考虑了变 TNR 对机载IRST系统探测性能的影响,深入分析了发现概率与大气能见距、目标速度和斜程角度之间的关系,得出了在不同条件下的最佳探测概率包线和最佳 TNR,为光电雷达作战效能评估提供了一定的理论依据。

## 2 基于 SNR 的作用距离模型

由于所研究的是远距离目标探测,因此根据参考文献[9],结合实际作战条件,采用了基于 SNR 的作用距离模型,其目标投影到探测器的尺度小于单个像元对应的角视场,下文中均按照点目标探测处理。

### 2.1 信号电压计算

目标及背景辐射经大气传输及光学系统转换后,到达探测器并产生电压,传输过程如图 1 所示。

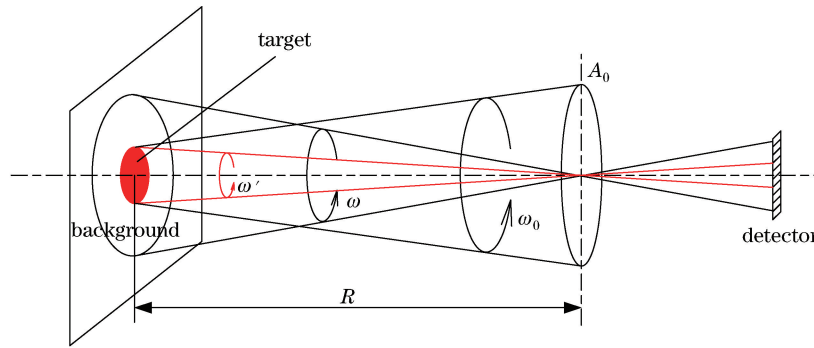


图 1 目标及背景辐射传输

Fig. 1 Radiation transmission of target and background

设目标在探测系统观察方位角上的辐射强度为  $I_t$ ,背景辐射亮度为  $L_b$ ,探测距离为  $R$ ,探测系统的瞬时视场为  $\omega$ ,目标相对探测器形成的张角为  $\omega'$ ,光学系统平均透射率为  $\tau_0^*$ ,入瞳面积为  $A_0$ ,大气平均透射率为  $\tau_{air}^*$ ,敏感元件电压响应率为  $\mathcal{R}$ ,则探测系统输出的信号电压<sup>[9-10]</sup>为

$$V_S = \tau_{air}^*(\lambda) \tau_0^*(\lambda) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[ \frac{I_t(\lambda)}{R^2} - L_b(\lambda) \omega' \right] A_0 \mathcal{R}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中  $V_S$  为信号电压,探测系统的探测波段为  $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 。

设  $A_t$  为目标有效面积,  $A_d$  为探测器面积,  $V_N$  为噪声电压的有效值,  $D^*(\lambda)$  为探测系统光谱探测率,  $\Delta f_{noise}$  为等效噪声带宽,则探测器电压响应率为

$$\mathcal{R}(\lambda) = \frac{V_N D^*(\lambda)}{\sqrt{A_d \Delta f_{noise}}}. \quad (2)$$

又因为

$$\omega' = A_t / R^2, \quad (3)$$

则将(2)、(3)式代入(1)式,可以得到信号电压为

$$V_S = \frac{A_0 V_N \tau_{air}^*(\lambda) \tau_0^*(\lambda)}{R^2 \sqrt{A_d \Delta f_{noise}}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [I_t(\lambda) - L_b(\lambda) A_t] D^*(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

### 2.2 作用距离模型计算

根据(4)式可得

$$R^2 = \frac{A_0 \tau_{air}^*(\lambda) \tau_0^*(\lambda)}{f_{SNR} \sqrt{A_d \Delta f}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [I_t(\lambda) - L_b(\lambda) A_t] D^*(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

式中  $f_{SNR}$  为信号电压与噪声电压的比值,即  $f_{SNR} = V_S / V_N$ 。

目前,IRST系统大多采用工作中红外波段的 InSb 线列阵探测器,通过光学或机械方法来扫描整个搜索视场,这类系统属于脉冲系统<sup>[9]</sup>。对于脉冲系统而言,脉冲信号在实际处理中会有损失,因此可引入信

号过程因子  $\delta$  来描述,其表达式为

$$\delta = V_p/V'_p, \quad (6)$$

式中  $V_p$  为实测信号峰值; $V'_p$ 为理论信号峰值,假定该值不受信号处理影响。

$$A_0 = \frac{1}{4} \pi D_0^2, A_d = \omega f^2, F = \frac{f}{D_0}, \quad (7)$$

式中  $D_0$  为入瞳直径, $f$  为光学系统焦距, $F$  为光学系统的  $F$  数。

可得探测系统作用距离方程为

$$R = \left\{ \frac{\pi D_0 \tau_{\text{air}}^* \tau_0^* \delta}{4 f_{\text{SNR}} \cdot F \sqrt{\omega} \cdot \Delta f} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [I_t(\lambda) - L_b(\lambda) A_t] D^*(\lambda) d\lambda \right\}^{1/2}. \quad (8)$$

(8)式作用距离  $R$  的求解属于超越方程的求解,无法计算出准确的  $R$  值。因此采用基于 SNR 的距离解算方法:先预设一个  $R$  值和检测阈值  $f_{\text{TNR}}$ ;再通过预设的  $R$  求解  $\tau_{\text{air}}^*$ ,并将  $R$  与  $\tau_{\text{air}}^*$  代入(8)式,计算 SNR;最后将 SNR 与预设的检测阈值  $f_{\text{TNR}}$  进行比较,反复循环,当 SNR 达到预设的检测阈值时,则输出该条件下的距离作为探测距离。当 SNR 预设值即 TNR 设置得不一样时,探测概率和虚警概率会发生变化,从而影响作用距离,进而严重影响光电系统的作战效能。

### 3 机载IRST系统探测点目标概率模型

在IRST系统中,采用恒虚警检测准则<sup>[1-2]</sup>,其检测概率和虚警概率是一对不可调和的矛盾。通常在SNR一定的情况下,随着虚警概率的降低,检测概率也会降低。但在实际作战中,根据作战背景和任务需求的不同,可允许的虚警概率是不同的,因此为了达到最佳的探测效果,TNR的设置也会有所调整。

#### 3.1 虚警概率、SNR和发现概率数学模型

##### 3.1.1 虚警概率数学模型

虚警概率是指IRST系统视场中没有出现目标而系统正确报警的概率。对点目标进行计算时,通常认为红外系统噪声分布规律为高斯分布<sup>[2-3]</sup>,其概率密度函数为

$$p(x) = \frac{1}{\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad (9)$$

式中  $\sigma$  为噪声的标准偏差。

由(9)式可得虚警概率为

$$P_{\text{fa}} = \int_{u_0}^{\infty} p(u) = \int_{u_0}^{\infty} u \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du = \exp\left(-\frac{u_0^2}{2}\right) = \exp\left(-\frac{f_{\text{TNR}}^2}{2}\right), \quad (10)$$

式中  $u_0$  为检测阈值。

##### 3.1.2 SNR数学模型

SNR数学模型可由(8)式得到,即为

$$f_{\text{SNR}} = \frac{V_S}{V_N} = \frac{\pi D_0 \tau_{\text{air}}^* \tau_0^* \delta}{4 R^2 F \sqrt{\omega} \cdot \Delta f} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [I_t(\lambda) - L_b(\lambda) A_t] D^*(\lambda) d\lambda. \quad (11)$$

##### 3.1.3 发现概率数学模型

发现概率是指IRST系统视场中出现目标且系统正确报警的概率。对于红外点目标探测系统,信号的变化速率远小于噪声的变化速率,在一定时域内,信号是时间的确定性函数<sup>[2,5]</sup>,因此探测器输出目标信号  $y_S$  和噪声电压  $y_N$  的总和和信号  $y_{\text{SN}}$  的概率密度函数为

$$p(y_{\text{SN}}) = \frac{1}{\sigma^2} \cdot \exp\left[-\frac{(y_{\text{SN}} - y_S)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (12)$$

则发现概率为

$$P_d = \int_{f_{\text{TNR}} - f_{\text{SNR}}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = \Phi(f_{\text{SNR}} - f_{\text{TNR}}) = \Phi[f_{\text{SNR}} - \sqrt{-2\ln P_{\text{fa}}}]。 \quad (13)$$

### 3.2 仿真分析

噪声的概率密度为  $p(x)$ , 信号加噪声的概率密度为  $p(y_{SN})$ , 虚警概率为  $P_{fa}$ , 发现概率为  $P_d$ , 漏警概率为  $P_t$ , TNR 为  $f_{TNRi} (i=1, 2, \dots, n)$ , 它们的关系如图 2 所示。

由(13)式可以看出, 发现概率  $P_d$ 、虚警概率  $P_{fa}$  和  $f_{SNR}$  存在一定的函数关系, 利用 Matlab 计算的结果如图 3 所示。可以看出当 SNR 阈值提高到 10 以上时, 发现概率  $P_d$  已非常接近甚至达到 100%。 $f_{SNR}$  与作用距离、目标和背景辐射强度、目标速度、大气透射率、系统噪声等多种因素有关, 因此有必要结合实际作战背景, 探索不同条件下目标探测概率的变化规律。

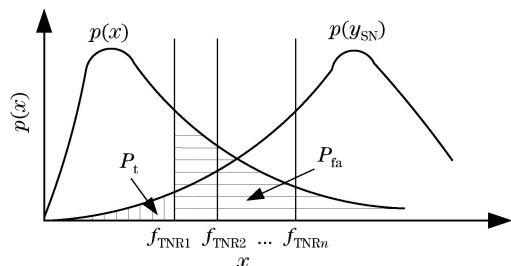


图 2 发现概率、漏警概率与虚警概率之间的关系  
Fig. 2 Relationship between recognition, missing and false alarm probability

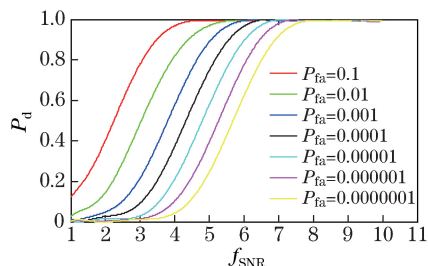


图 3 发现概率与 SNR 之间的关系曲线  
Fig. 3 Relation curves between recognition probability and SNR

作战背景一: 受雨雪雾霾的影响, 大气透射率严重降低, 从而影响了目标的探测概率, 因此在不同能见距下, 目标探测概率随作用距离变化规律的研究意义重大。作战背景二: 由于目标机速度越大, 蒙皮温度和尾喷口温度就越高, 辐射强度就越强, 因此目标的某一辐射波段极易被探测, 这点在对高超音速目标探测时尤为明显。因此, 研究不同作用距离下目标发现概率随目标速度的变化规律意义重大。作战背景三: 由于在侦查目标机时, 几乎均存在高度差, 而斜程角衰减是影响大气透射率的重要因素, 因此, 研究不同高度差下目标发现概率随目标仰角的变化规律意义重大。

针对三种不同的作战背景, 根据模型进行实验仿真。IRST 系统的红外探测器参数见表 1。

表 1 红外探测器参数  
Table 1 Parameters of infrared detector

$\tau_0^*$	$\Delta f / \text{Hz}$	$f / \text{mm}$	$F$	$\omega / [(\circ) \times (\circ)]$	$\delta$	$D_0 / \text{mm}$	$\lambda / \mu\text{m}$
0.7	$10^3$	300	3	$1.5 \times 1.0$	0.9	100	3-5

目标机参数: 将目标机看成点目标, 在作战背景一和作战背景三下, 目标机飞行马赫数为 5; 在作战背景二下, 目标机飞行马赫数由 0 变化到 10。

大气参数: 在作战背景一下, 能见距由 15 km 变化到 5 km; 在作战背景二和三下, 能见距均为 15 km。

虚警概率要求小于等于 0.001, 仿真结果如图 4~6 所示。

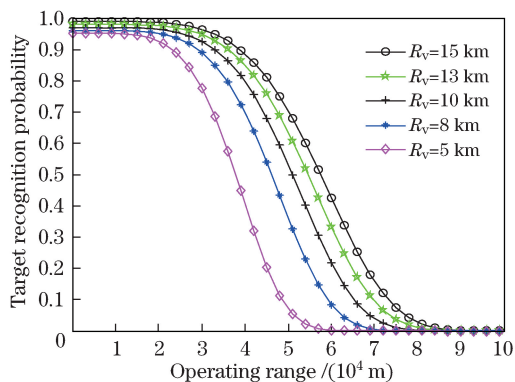


图 4 目标发现概率随作用距离的变化  
Fig. 4 Change of target recognition probability with operating range

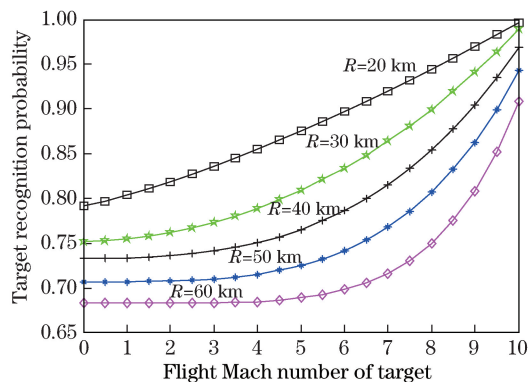


图 5 目标发现概率随目标飞行马赫数的变化  
Fig. 5 Change of target recognition probability with flight Mach number of target

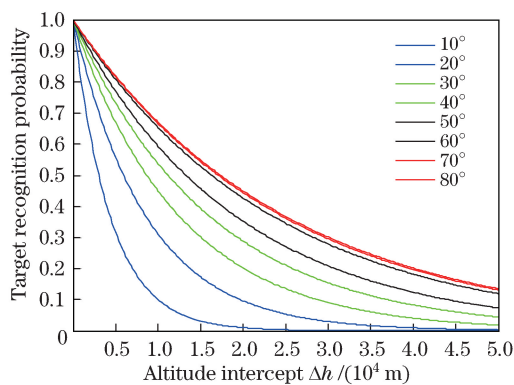


图 6 不同斜程角度下,目标发现概率随高度差的变化

Fig. 6 Change of target recognition probability with altitude intercept under different oblique angles

从图 4 可知,距离越大、能见距越低,目标被发现的概率就越小;在 0~20 km,目标发现概率均在 0.9 以上,可视为能有效探测目标,但随着距离的增加,发现概率呈逆指数下降趋势,直到 70 km 以后几乎不能发现目标;在 20~70 km,目标发现概率随大气能见距  $R_v$  的减小而下降明显.在同一距离下,大气能见距越低,目标发现概率就越低.因此,大气状况直接影响战机作战。

从图 5 可知,目标速度越快、距离越近,目标被发现的概率越大。这是因为目标速度越快,温度越高,根据普朗克定律可知,目标的红外辐射强度也越大。在距离较近时,目标被发现的概率随目标速度的增加近似为线性增长;在距离较远时,目标被发现的概率随目标速度的增加呈指数增长的趋势,且距离越远,增长趋势越明显。这是因为距离较近时 IRST 系统容易发现目标,而距离越远,辐射量越小,目标被发现概率就越小。这与实际情况基本符合。

从图 6 可知,高度差越大、斜程角度越小,目标被发现的概率就越低;在同一高度差下,探测目标的仰角越小,目标被发现概率就越小。该趋势的变化为斜程探测发现目标提供了参考依据。

综上所述,发现概率  $P_d$  与作用距离、目标速度、斜程角度、大气透射率等多种因素有关。因此,在允许的虚警概率下,合理的设置检测阈值  $f_{TNR_i} (i=1,2,\dots,n)$ ,可达到最佳的探测效果。

## 4 机载 IRST 系统探测概率包线研究

### 4.1 目标机辐射强度数学模型

为了获得最佳 TNR 和最佳探测概率包线,首先要建立目标辐射数学模型。对于目标机来说,发动机尾喷口辐射、尾焰辐射和气动加热导致的蒙皮辐射是其红外辐射的主要来源<sup>[5-8]</sup>。其不同部位温度的表达式为

$$\begin{cases} T_{\text{head}} = T_0 \left[ 1 + r \left( \frac{\gamma - 1}{2} \right) (V_t/V_0)^2 \right] \\ T_{\text{side}} = 216.7 [1 + 0.164 (V_t/V_0)^2] \\ T_{\text{tail}} = T_a \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \end{cases}, \quad (14)$$

式中  $T_{\text{head}}$ 、 $T_{\text{side}}$  和  $T_{\text{tail}}$  分别为目标迎头驻点、蒙皮和尾部温度,  $T_0$  为周围大气温度;  $V_0$  和  $V_t$  分别表示实地音速和目标马赫数;  $\gamma$  为质量热熔比,一般取  $\gamma=1.4$ ;  $r$  为恢复系数,层流下  $r=0.82$ ,紊流下  $r=0.87$ ;  $T_a$  为尾喷口涡轮后边热电偶读出的废气温度;  $P_1/P_0$  表示静压比,一般  $P_1/P_0=0.5$ 。

由普朗克定律得到目标辐射出射度为

$$M(\lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp[c_2/(\lambda T)] - 1}, \quad (15)$$

式中  $c_1=3.7415 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$  为第一辐射常量,  $c_2=1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$  为第二辐射常量;  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  表示辐射波段。

在目标水平面内,目标本征辐射强度的空间分布包线为

$$F_{\text{rad}}(\alpha, I_{\text{level}}) = \begin{cases} \epsilon_t(\lambda) \left[ \frac{M_{\text{head}}}{\pi} A_{\text{head}} \cos \alpha + \frac{M_{\text{side}}}{\pi} A_{\text{side}} |\sin \alpha| \right], & 0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2} \text{ or } \frac{3\pi}{2} \leq \alpha < 2\pi \\ \epsilon_t(\lambda) \frac{M_{\text{side}}}{\pi} A_{\text{side}} |\sin \alpha| + \epsilon_a(\lambda) \frac{M_{\text{tail}}}{\pi} A_{\text{tail}} |\cos \alpha|, & \frac{\pi}{2} \leq \alpha < \frac{3\pi}{2} \end{cases}, \quad (16)$$

式中  $\epsilon_t(\lambda)$  和  $\epsilon_a(\lambda)$  分别为目标蒙皮和尾焰气体发射率;  $M_{\text{head}}$ 、 $M_{\text{side}}$  和  $M_{\text{tail}}$  分别为目标迎头驻点、蒙皮和尾喷辐射出射度;  $A_{\text{head}}$  为机头辐射面积,  $A_{\text{side}}$  为蒙皮辐射面积,  $A_{\text{tail}}$  为机尾辐射面积;  $\alpha$  为方位角。

在目标俯仰平面内,目标本征辐射强度的空间分布包线为

$$F_{\text{rad}}(\theta, I_{\text{pitch}}) = \begin{cases} \epsilon_t(\lambda) \left[ \frac{M_{\text{head}}}{\pi} A_{\text{head}} \cos \theta + \frac{M_{\text{on}}}{\pi} A_{\text{on}} |\sin \theta| \right], & 0 \leq \theta < \frac{\pi}{2} \text{ or } \frac{3\pi}{2} \leq \theta < 2\pi \\ \epsilon_t(\lambda) \frac{M_{\text{below}}}{\pi} A_{\text{below}} |\sin \theta| + \epsilon_a(\lambda) \frac{M_{\text{tail}}}{\pi} A_{\text{tail}} |\cos \theta|, & \frac{\pi}{2} \leq \theta < \frac{3\pi}{2} \end{cases}, \quad (17)$$

式中  $A_{\text{below}}$  为目标下表面辐射面积,  $A_{\text{on}}$  为目标上表面目标辐射面积;  $M_{\text{on}}$  为目标上表面辐射出射度,  $M_{\text{below}}$  为目标下表面辐射出射度, 且  $M_{\text{on}} = M_{\text{below}}$ ;  $\beta$  为俯仰角。

### 4.2 机载IRST系统探测能力包线数学模型

结合(8)式所示的作用距离数学模型和(16)、(17)式所示的目标本征辐射强度, 可得机载IRST系统水平探测能力包线的数学模型为

$$R_{\text{level}}(\alpha) = \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} k \cdot [F_{\text{rad}}(\alpha, I_{\text{level}}) - I_b(\lambda)] \frac{\pi D_0 \tau_{\text{air}}^* \tau_0^* \delta}{4 f_{\text{SNR}} \cdot F \sqrt{\omega} \cdot \Delta f} \cdot d\lambda \right]^{1/2}, \quad (18)$$

而机载IRST系统俯仰探测能力包线数学模型为

$$R_{\text{pitch}}(\theta) = \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} k \cdot [F_{\text{rad}}(\theta, I_{\text{pitch}}) - I_b(\lambda)] \frac{\pi D_0 \tau_{\text{air}}^* \tau_0^* \delta}{4 f_{\text{SNR}} \cdot F \sqrt{\omega} \cdot \Delta f} \cdot d\lambda \right]^{1/2}. \quad (19)$$

### 4.3 机载IRST系统探测能力包线仿真分析及最佳门限的选择

根据上述数学模型进行实验仿真, 目标为某型战斗机, 计算出此飞机各个视图的面积  $A_{\text{head}} = 9.32 \text{ m}^2$ ,  $A_{\text{side}} = 33.25 \text{ m}^2$ ,  $A_{\text{tail}} = 7.86 \text{ m}^2$ ,  $A_{\text{on}} = A_{\text{below}} = 106.28 \text{ m}^2$ ; 实地音速  $V_0 = 340 \text{ m/s}$ , 目标马赫数  $V_1$  为 3; 尾焰废气温度  $T_0 = 875 \text{ K}$ ; 水平探测时, 设定我机高度  $H_1$  和目标机高度  $H_2$  有  $H_1 \approx H_2 = 8 \text{ km}$ ; 俯仰探测时, 设定  $H_1 = 8 \text{ km}$  和  $H_2 = 10 \text{ km}$ ; 探测目标红外波段为  $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 。

根据作战任务和危险系数的要求, 为了保证探测效果, 虚警概率不允许过大。在实际作战中, 目标距离越近, 机载IRST随着目标快速移动, 目标极易逃出探测器视场, 不容易跟踪锁定, 且为了保证我机安全, 发现距离需要大于一定的安全距离。且由于SNR越高, 对系统性能的要求也越高, 因此需要设置一个合理的范围。

经上述分析, 需要达到的具体指标有: 1) 虚警概率  $P_f \leq 10^{-4}$ ; 2) 发现距离  $R \geq 20 \text{ km}$ ; 3) TNR 设定在  $2 \sim 10$  范围内; 4) 发现概率  $P_d \geq 0.85$ 。

当大气能见距  $R_v = 20 \text{ km}$ 、虚警概率值  $P_f = 10^{-4}$  时, 目标机的水平和俯仰探测包线如图 7、8 所示。

图 7 仿真分析了不同方位角、不同 TNR 下的探测概率包线, 可以看出, 最佳的探测方位在目标机的尾部, 因为其辐射量最强。图 8 仿真分析了不同俯仰角、不同 TNR 下的探测概率包线, 可以看出, 仰视探测的作用距离远小于俯视探测的作用距离。这是因为低空环境水蒸气含量更集中, 对红外辐射吸收能力更强, 因此在探测距离包线中表现为探测距离的急剧下降。从图 7、8 总体上看, 随着 TNR 的减小, 作用距离包线范围逐渐增大, 但探测概率逐渐减小。在满足作战探测概率的前提下, 在每条概率包线上都可求得最大作用距离的位置点, 此位置点即为机载IRST系统的最佳探测点, 结果见表 2。因此, 机载光电雷达在探测过程中, 应该尽量在此最佳探测点附近飞行, 以达到最佳探测效果。综上所述, 最佳的 TNR 应该设置在  $8 \sim 10$  范围内。

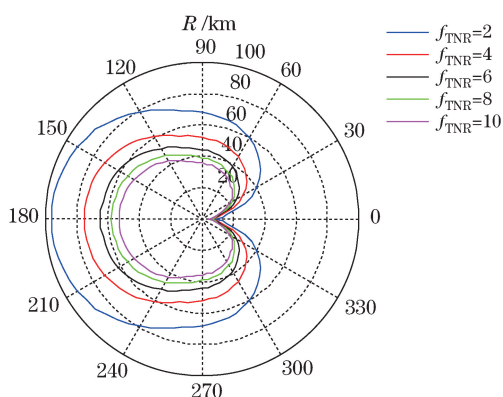


图 7 IRST 系统水平探测包线

Fig. 7 Level detection envelope of IRST system

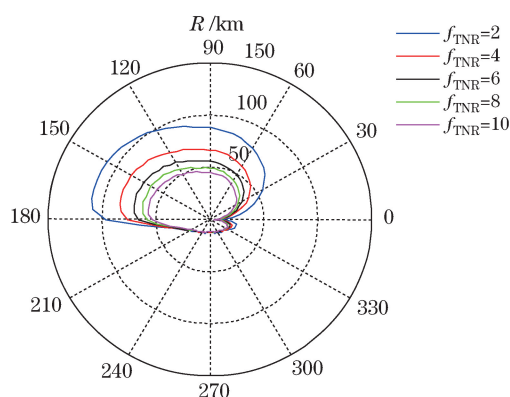


图 8 IRST 系统俯仰探测包线

Fig. 8 Pitch detection envelope of IRST system

表 2 不同 TNR 下的发现概率和最大作用距离

Table 2 Recognition probability and maximum range under different TNRs

$f_{TNR}$	2	4	6	8	10
$P_d$	0.25	0.44	0.75	0.87	0.95
$R_{level,max} / km$	98.784	72.762	64.526	57.714	51.552
$R_{pitch,max} / km$	118.657	85.453	69.235	62.639	54.397

## 5 结 论

针对机载 IRST 系统在理论和实际应用中发现概率过低、虚警概率过高的问题,采用了基于 SNR 的作用距离模型、点目标探测概率模型和探测包线模型,结合实际作战背景和提出的技术指标,仿真分析了虚警概率、发现概率和 SNR 之间的关系曲线,得到了发现概率与作用距离、大气能见距、斜程角度之间的关系曲线,以及不同 TNR 条件下的探测概率包线。通过仿真分析可知,目标被发现的概率随作用距离的增加、大气能见距的降低、斜程角度的减小而呈现出下降的趋势。为了满足不同条件下的作战需求,达到最佳探测效果,可将 IRST 系统的 TNR 设定在 8~10 范围内。

## 参 考 文 献

- [1] Qi Meng. Detection probability of IR search and track system[J]. Laser & Infrared, 2004, 34(4): 269-271.  
祁 蒙. 红外搜索跟踪系统的探测概率研究[J]. 激光与红外, 2004, 34(4): 269-271.
- [2] Liu Hui. Infrared electric detection principle[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 202-207.  
刘 辉. 红外光电探测原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 202-207.
- [3] 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.  
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.
- [4] Wang Haiyan. The infrared radiation and application[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2014: 246-249.  
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.
- [5] Wang Ling, 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.  
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.  
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 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.

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.

- [8] Zhang Jihua, Yao Dongsheng, Tan Bin. Analysis on effect factors of ground-based electro-optic system detection ability on space object[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1178-1183.

张己化, 姚东升, 谈 斌. 地基光电系统空间目标探测影响因素分析[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1178-1183.

- [9] Wu Hanping. Infrared search system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 217-239.

吴晗平. 红外搜索系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 217-239.

- [10] Fu Qiang, Shi Guangwei, Zhang Xin. Modeling and evaluation of infrared point-target operating range[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(8): 1991-1997.

付 强, 史广维, 张 新. 红外点目标作用距离数学建模与评估[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 1991-1997.