

文章编号:1001-5078(2024)05-0758-08

· 红外技术及应用 ·

温变环境下优化机载IRST系统探测包线研究

王芳¹, 王薇¹, 王海晏¹, 寇人可²

(1. 空军工程大学航空工程学院, 陕西西安 710038; 2. 陆军工程大学石家庄校区, 河北石家庄 050003)

摘要: 基于目前温度变化对机载红外搜索跟踪(IRST)系统探测距离的影响, 建模分析了系统探测流程中目标与背景辐射对比度、大气透过率、光学系统、探测器性能随温度的变化情况, 基于此提出了依据温度变化设置探测系统阈噪比的思想, 且给出了具体设置算法。进一步仿真对比了优化阈噪比与传统恒定阈噪比条件下的探测概率包线, 结果表明, 前者的探测包线明显增大, 说明依据温度设置阈噪比的方法可以显著提高IRST的探测性能。

关键词: 温度; 阈噪比; 探测概率包线

中图分类号: TN219; TN976 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.05.015

Detection probability envelope of airborne IRST system after environment temperature changing optimization

WANG Fang¹, WANG Wei¹, WANG Hai-yan¹, KOU Ren-ke²

(1. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Army Engineering University Shijiazhuang Campus, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: According to the current influence of temperature changes on the detection range of airborne infrared search and tracking(IRST) systems, the changes of target and background radiation contrast, atmospheric transmittance, optics, and detector performance with temperature in the detection process of the system are modeled and analyzed. Based on this, the idea of dynamically setting of the threshold noise ratio according to the temperature change is proposed, and the specific setting algorithm is given. The detection probability envelope under the optimized threshold-to-noise ratio and the traditional constant threshold-to-noise ratio conditions is further simulated and compared, and the results show that the detection envelope of the former increases significantly, indicating that the method of setting the threshold-to-noise ratio according to the temperature can significantly improve the detection performance of IRST.

Keywords: temperature; variable threshold noise ratio; detection probability envelope

1 引言

在复杂强电磁干扰环境下, 雷达探测近乎失效, 而红外搜索跟踪(IRST)系统具有抗干扰能力强、可全天候、全空域被动探测的特点, 被广泛运用在机载、舰载、星载等装备上, 对远距离来袭目标进行早期预警和侦察。但IRST系统在探测过程中, 对温度

较为敏感, 这将直接影响IRST系统的探测性能。因此, 有必要深入研究在变温条件下IRST系统作用距离的变化情况, 为提高探测能力提供理论依据。

目前国内外很多文献对IRST性能进行了研究, 文献[1]、[2]给出不同背景环境下探测概率的计算公式, 文献[3]、[4]提出了探测概率与探测包线的

作者简介: 王芳(1982-), 女, 副教授, 主要从事机载光电探测与对抗研究。E-mail: 80778084@qq.com。

通讯作者: 王薇(1983-), 女, 硕士, 讲师。E-mail: 58809351@qq.com

收稿日期: 2023-07-18; **修订日期:** 2023-09-16

关系,文献[5]根据作战环境,给出了最佳阈噪比范围,然而以上研究都忽略了温度变化对探测效果的影响。文献[6]分析了温度变化对光学元件的热效应,文献[7]重点分析了温度对目标红外成像的影响,这些研究重点关注在红外成像清晰度方面,而当前机载IRST获取目标的主要方式还是以信号幅度为探测依据。本文以空天为背景,分析了温度变化对机载探测系统各环节的影响,提出了依据温度变化动态设置阈噪比的方法,并仿真对比了优化后的探测效果。

2 温度对机载IRST系统探测环节影响分析

2.1 机载IRST工作流程

图1所示为机载IRST系统工作框图,目标发出的辐射经大气传输,被系统接收。辐射透过光学系统,汇聚于探测器上,探测器将光信号转变为电信号,通过电信号的幅值大小判断目标的有无。探测过程主要可分为四个环节:目标辐射、大气传输、光学系统、探测器,而这四个环节对信号的输出效果都与温度有关。本文将主要研究各个环节中温度对辐射效果的影响。为方便具体研究,将影响系统探测效果的温度进一步分为三种:一是目标所处的天空背景温度,称为背景温度,二是探测路径上的大气温度,称为环境温度;三是IRST系统内部的温度,主要分IRST光机结构舱内的温度、探测器的温度两种。

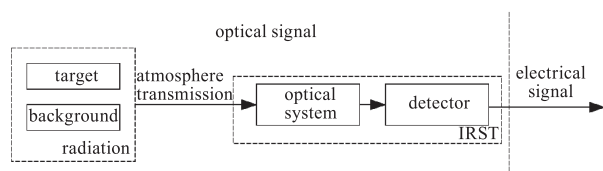


图1 IRST系统工作框图

Fig. 1 IRST system working block diagram

2.2 温度对各环节影响分析

2.2.1 背景温度影响分析

机载IRST系统主要用于探测空中目标,背景为天空背景。天空背景的温度主要与大气分子、气溶胶粒子、云层对太阳光的散射,地面对其反射的太阳辐射,以及自身温度有关。

天空背景温度近似为 $T_b = 300\text{ K}$ 的黑体^[8],飞机蒙皮温度用式(1)^[8]表示。借用普朗克辐射定律^[9],图2仿真了飞行速度 $Ma = [0.5\ 1.3\ 2.4\ 3]$,蒙皮材料发射率 $\varepsilon = 0.8$ 时,背景和目标在波长 $\lambda = 1 \sim 14\ \mu\text{m}$ 的辐射情况。

$$T_{\text{skin}} = T_0 \cdot (1 + r \cdot \frac{\gamma - 1}{2} \cdot Ma^2) \quad (1)$$

式中, T_0 为大气温度,随高度变化; r 为恢复系数,一般层流取 0.85,紊流取 0.88; γ 为大气质量比热容,一般取 1.4; Ma 为飞行速度。

从图2明显看出,飞行速度在 1Ma 附近时,目标蒙皮红外辐射度与背景相差不大,说明这时背景温度对红外探测的影响较大,探测效果不好;当飞行速度 $Ma < 1$ 时,目标的红外辐射度小于背景的辐射度,目标将淹没在背景中,不容易探测到目标;当飞行速度 $Ma > 1$ 时,目标的红外辐射度远大于背景红外辐射度,目标容易被探测到。说明背景温度对机载红外探测的影响主要集中在低马赫数的情况。

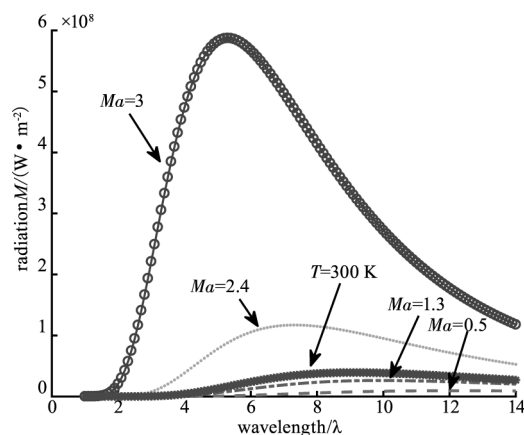


图2 目标与背景的辐射

Fig. 2 The radiation of targets and background

2.2.2 环境温度影响分析

从图1的工作流程可以看出,大气对辐射的透过率直接影响了探测器接收到的辐射能。而大气的透过率与其温度息息相关。工程应用中大气透过率计算公式多采用如下表达式:

$$\tau_{\text{air}} = \tau_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \tau_{\text{CO}_2} \cdot \tau_{\text{scat}} \quad (2)$$

式中, τ_{air} 为大气总透过率, $\tau_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 τ_{CO_2} 分别为水蒸气、二氧化碳吸收透过率; τ_{scat} 为大散射透过率。

温度变化对二氧化碳的吸收、散射透过率影响较小,这里忽略不计^[10]。温度变化对水蒸气吸收透过率影响公式^[10]为:

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}} = -0.03198 \times [H_r(z) \times H_a(T) \cdot R \cdot \left(\frac{P(z)}{P_0}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{T_0}{T(z)}\right)^{0.25 \cdot 0.7301}] + 1 \quad (3)$$

式中, z 表示大气高度; $H_r(z)$ 表示 z 点的相对湿度; $H_a(T)$ 表示温度对应的饱和水蒸气含量; R 为传输距离; $P(z)$ 表示 z 点的大气压强; P_0 表示海平面上

的大气压强; T_0 表示海平面上大气温度; $T(z)$ 表示 z 点的温度; 在对流层中其表达式^[11]为:

$$T(z) = T_0 - \frac{1}{R} \frac{k-1}{k} \cdot z \quad (4)$$

式中, R 为气体常数; k 为空气绝热指数。

图3仿真了中纬度地区, 高度 $z < 2$ km 时水蒸气透过率随温度的变化情况, 初始值采用文献[8]中纬度大气模型。从仿真图中可看出, 随着温度的升高, 水气透过率总体呈下降趋势。夏季的平均透过率值远低于冬季, 主要是由于夏季的水气密度高于冬季所致, 与实际情况相符; 并且可以看出, 随着外部温度的升高, 水气透过率的下降幅度明显增大, 当温度超过 $t \geq 5$ °C 时, 温度每升高 2 °C, 透过率下降近 0.1。

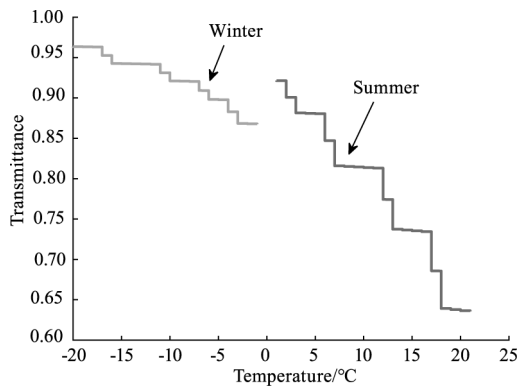


图3 中纬度不同温度水气透过率

Fig. 3 The transmittance of H_2O at different temperature in the middle dimension

2.2.3 内部温度影响分析

环境温度与舱内的温度均影响光学系统对辐射的透过率。光学系统的透过率可用下式表示:

$$\tau_o = \frac{Q}{Q_0} \quad (5)$$

式中, τ_o 为光学系统透过率; Q 为光学系统输出的能量; Q_0 为光学系统接收的能量。

机载IRST接收目标的辐射相当于远处光线平行入射, 依据光的电磁理论, 可得其反射率模型为:

$$\rho = \left(\frac{n' - n}{n' + n} \right)^2 \quad (6)$$

式中, ρ 为光学系统反射率; n 、 n' 分别为光学系统镜面1和镜面2的折射率, 这里将光学镜面间的空气也当作镜面考虑。

入射能 Q_0 通过厚度为 d 的光学系统, 仅考虑光的吸收损失, 其出射光辐射能可表示为:

$$Q = Q_0 P^d \quad (7)$$

式中: P 为光学系统镜面的透明率;

假设光学系统有 m 个镜面, 则辐射能通过光学系统后损减为:

$$Q = Q_0 (1 - \rho_1) (1 - \rho_2) \cdots (1 - \rho_m) P_1^{d_1} P_2^{d_2} \cdots P_m^{d_m} \quad (8)$$

则光学系统的透过率为:

$$\tau = \frac{Q}{Q_0} = (1 - \rho_1) (1 - \rho_2) \cdots (1 - \rho_m) P_1^{d_1} P_2^{d_2} \cdots P_m^{d_m} \quad (9)$$

而IRST系统舱内温度变化会导致光学镜面折射率及厚度的变化, 这将改变光学系统的透过率。温度变化后, 光学镜面折射率公式变为:

$$n' = n + \beta \Delta t \quad (10)$$

式中, β 为光学镜面折射率温度系数, 红外光学材料的 β 值远远高于可见光材料;

温度变化后镜面的厚度变为:

$$d' = d(1 + \alpha \Delta t) \quad (11)$$

式中, α 为光学镜面热膨胀系数, 将 n' 值代入式(6)可求得反射率 ρ 随温度的变化, 再将其值与 d' 代入式(9), 可得出温度改变对光学系统透过率的影响。图4选取常用的三种红外光学材料 Ge、Si、ZnS 作为研究对象, 仿真了温度增量从 0 变到 100 °C 时, 光学系统的透过率变化情况。对比看出, 温度的改变对 Ge 材料透过率的影响最大, Si 次之, ZnS 最小。且随着温度的升高, 光学系统透过率受温度的影响变大, 如 Ge 材料从 $\Delta t = 20$ °C, 增加到 $\Delta t = 30$ °C, 透过率变化量为 $\Delta \tau = 0.0006$, 而从 $\Delta t = 80$ °C 增加到 $\Delta t = 90$ °C, 透过率变化量增大到 $\Delta \tau = 0.002$ 。说明温度越高, 光学系统透过率受温度影响越大。

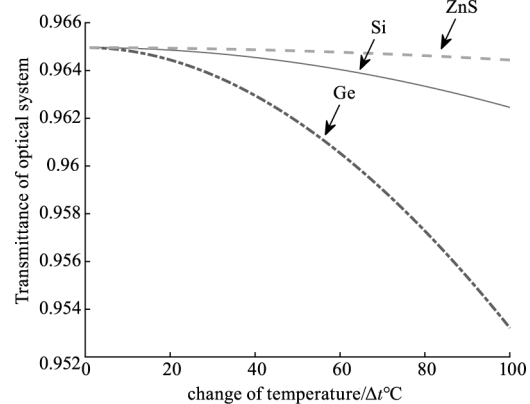


图4 光学系统透过率随温度的变化

Fig. 4 The relationship of the transmittance of optical system and the change of temperature

温度对红外探测器探测性能的影响尤为突出。探测器的性能通常用比探测率(D^*)表示。其表达式^[12]为:

$$D^* = 0.31 \frac{\lambda}{hc} k \left(\frac{G}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

式中, λ 为波长; h 为普朗克常数; c 为光速; k 的取值与探测器复合与背侧反射的贡献有关, 通常 $1 \leq k \leq 2$, a 为吸收系数; G 为热生成率; G/α 表示为单位面积上的热生成率, 其值与载流子密度 n_{th} 、载流子寿命 τ 有关。式(12)、(13)分别给出 n_{th} 、 τ 的具体表达式, 可看出 n_{th} 、 τ 均与温度 T 有关, 进而可得, D^* 与温度 T 有关:

$$n_{th} = \frac{9.56 \times 10^{14} (E_g T)^{\frac{3}{2}} (1 + 3.25KT/E_g)}{1 + 1.9E_g^{\frac{3}{4}} e^{\frac{E_g}{2KT}}} \quad (12)$$

$$\tau = \frac{\pi h^4 c_1}{\sqrt{2} \epsilon_d^2 m^{\frac{3}{2}} h v^{\frac{1}{2}} KT} \quad (13)$$

式中, E_g 为禁带宽度; K 为玻尔兹曼常数; T 为热力学温度; ϵ_d 为形变势常量; m 为载流子有效质量; h 为普朗克常量; v 为光频率; c_1 为纵向弹性系数平均值。

图5 选用目前红外探测器常用材料 HgCdTe、QWIP、extrinsic Si 作为研究对象, 仿真了比探测率

随温度的变化情况。从图中可以看出: 温度越高, 探测器的比探测率越低, 这主要是由于随着温度的升高, 单位面积上的热生成率减小引起的。且随着温度的升高, 比探测率减小的越快, 这也正是机载IRST工作需要制冷的主要原因。

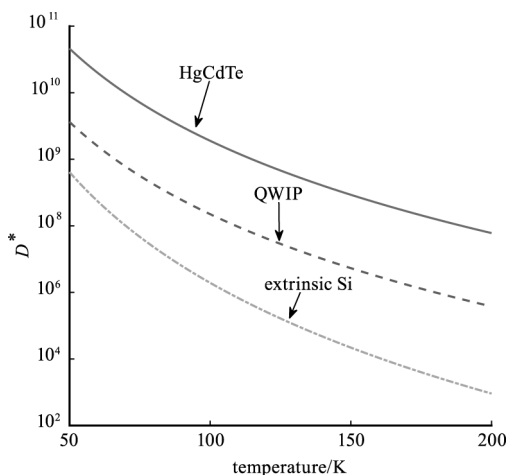


图5 比探测率随温度变化关系

Fig. 5 The relationship of specific detectivity and temperature

2.3 温度对探测距离影响分析

空空作战中, 机载IRST系统一般将目标视为点目标, 探测距离、探测概率、虚警概率是衡量其探测性能的重要指标。式(14)为基于阈噪比的探测距离公式^[6]:

$$R = \sqrt{\frac{A_0}{R_{TNR} \sqrt{A_d \Delta f}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{air}(\lambda, T_w) \tau_o(\lambda, T_{n_1}, T_w) [I_t(\lambda, T_t, \alpha, \beta) - I_b(\lambda, T_b, \alpha, \beta)] D^*(\lambda, T_{n_2}) d\lambda} \quad (14)$$

式中, A_0 为入瞳面积; τ_{air} 、 τ_o 分别为大气透过率、光学系统透过率; T_w 代表环境温度; T_{n_1} 代表内部舱的温度; I_t 代表目标辐射强度; I_b 为背景辐射强度; T_t 代表目标温度、 T_b 代表背景温度; α 、 β 分别为目标机在我机坐标的方位角、俯仰角, 其大小影响了探测器接收到的目标辐射照度; D^* 为比探测率, T_{n_2} 代表内部探测器的温度, R_{TNR} 为系统阈噪比, $R_{TNR} = I_t/\sigma$; I_t 为门限电流; σ 为噪声电流均方根; A_d 为探测器面积; Δf 代表探测噪声等效带宽。

(14)式可看出, 作用距离与温度是密切相关的。图6 仿真了恒定阈噪比条件下, 温度对作用距离的影响。机载IRST系统各参数设置参照表1。

表1 机载IRST系统参数

Tab.1 The parameters of infrared search track system

Δf /Hz	A_d /mm ²	A_0 /cm ²	λ /μm	α	β
1000	0.0001	1	3~5	$\pi/1.5$	0

图6(a)仿真了背景温度为 $T_b = 300$ K, 目标飞行速度 $Ma = [0.5 \ 1.3 \ 2.1 \ 2.9]$, 探测距离随温度的变化情况, 明显看出, 当目标与背景的对比低较低时, 探测距离是很小的, 目标不容易被探测到。图6(b)仿真了环境温度变化时, 探测距离的变化情况, 可看出, 在其他条件不变的情况下, 探测距离走势与透过率保持一致, 随着温度的升高呈现下降趋势, 并且夏季下降的趋势快于冬季, 主要原因是夏季的水气密度比较高, 导致其作用距离下降明显。图6(c)仿真了当IRST系统选用ZnS材料作为光学系统, 透

过率 $\tau_0 = 0.965$, HgCdTe 材料作为探测器时, 探测距离随探测器温度的变化情况。可看出, 随着温度的升高, 探测距离急剧下降, 主要是由于比探测率随温度的升高, 探测性能数量级下降所致。

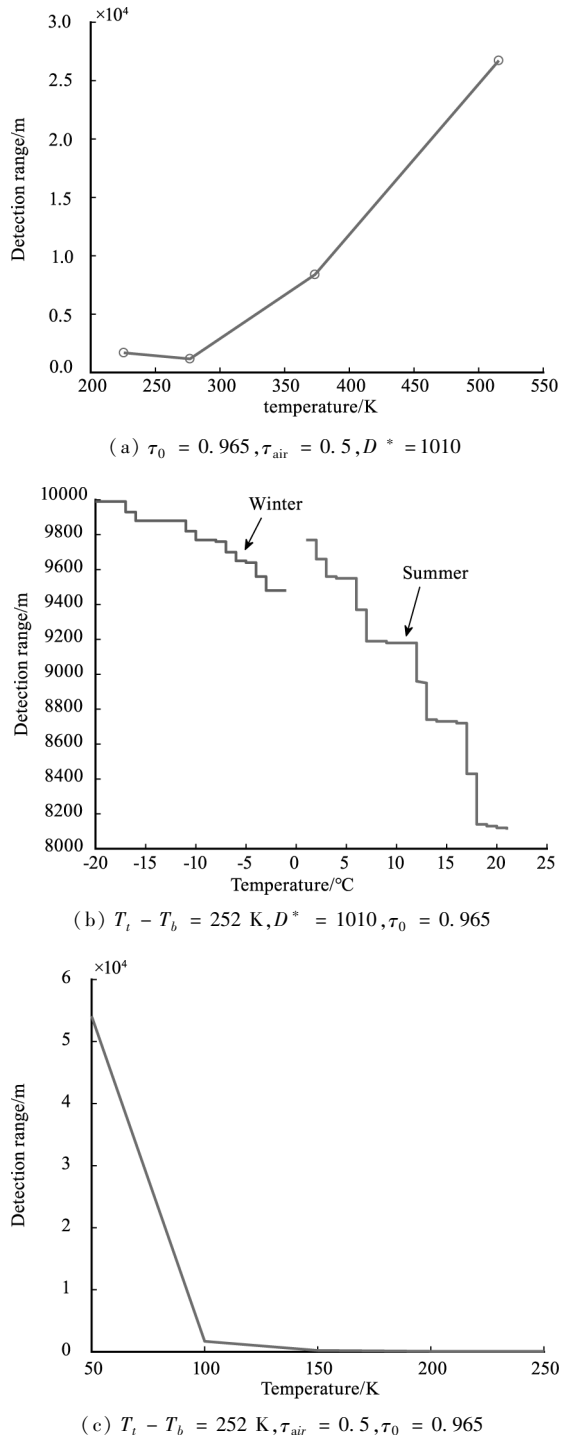


图 6 最远探测距离随温度变化关系

Fig. 6 The relationship of the maximum detection range and temperature

3 温变环境下阈噪比研究

机载 IRST 系统以信号幅度为探测依据, 如果阈噪比设置的偏大, 在其他作战条件相同的情况下, 系

统的探测概率就会变小, 影响探测性能; 如果阈噪比设置的偏小, 系统的虚警概率就会变大, 导致系统很难从众多目标中分辨出真实目标, 间接影响了系统的最远作用距离。

探测概率是指机载 IRST 探测到真实目标的概率, 其值与阈噪比有关^[6]:

$$P_d = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left\{ \left(\frac{1}{2} + R_{\text{TNR}} \right)^{\frac{1}{2}} - \ln^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{\exp(-0.5 \times R_{\text{TNR}}^2)} \right] \right\} \quad (15)$$

式中, P_d 为探测概率; R_{TNR} 为阈噪比; $\operatorname{erf}(\cdot)$ 为误差函数。

虚警概率是指机载 IRST 探测到虚假目标的概率, 其值与阈噪比的关系为^[6]:

$$P_{fa} = \exp \left(-\frac{1}{2} R_{\text{TNR}}^2 \right) \quad (16)$$

式中, P_{fa} 为虚警概率。

图 7 仿真了阈噪声比与探测概率、虚警概率关系。从图中可看出, 阈噪比较小时, 探测概率增大, 但同时虚警概率也增大; 随着阈噪比的增大, 虚警概率变小, 但同时探测概率也减小了。由此可看出合理设置阈噪比是机载 IRST 系统探测目标的关键环节。

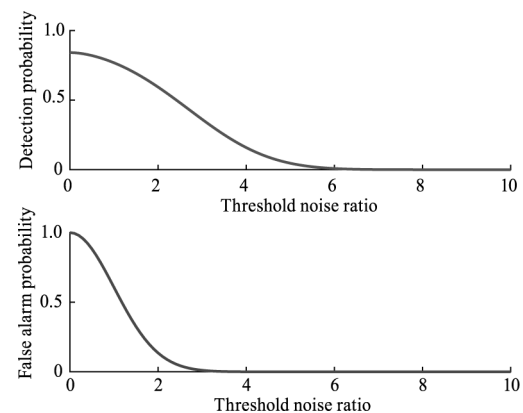


图 7 阈噪比与探测概率、虚警概率关系

Fig. 7 The relationship of the threshold noise ratio Vs detection probability, and Vs false alarm probability

3.1 变阈噪比求解方法

基于阈噪比与作用距离、探测概率、虚警概率的关系, 联合作用距离与温度的关系, 本文提出一种针对探测器温度变化时的机载 IRST 系统最佳阈噪比取值算法。背景温度、环境温度变化的计算方法类似。算法示意图如图 8 虚线所示, 先计算此温度下最小作用距离处的探测概率, 随着作用距离的增加, 探测概率减小, 当减小到指标要求的最小探测概率

时,再增大虚警概率,当虚警概率增大到指标要求的最大虚警概率时,对应的作用距离即为此温度下的最远探测距离,相应的阈噪比值即为最佳阈噪比。

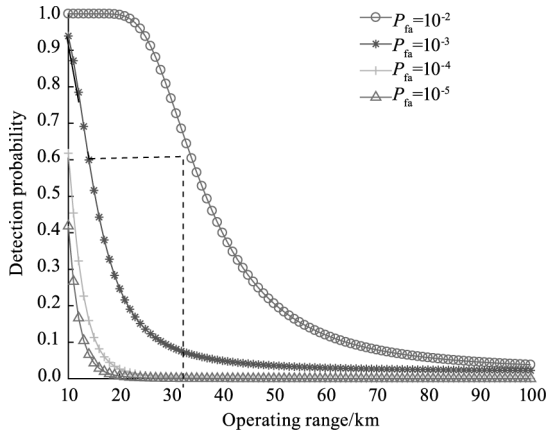


图8 变阈噪比求解示意图

Fig. 8 Variable threshold noise ratio solution diagram

算法具体步骤为:

(1) set initial variable

$$T = 100 \text{ K}, R_{\min}, R_{\text{step}}, P_{d0}, P_{\text{famin}} \sim P_{\text{famax}}$$

(2) Variable assignment

$$T = T_i, R = R_{\min}, R_{\text{step}} = 10$$

(3) Computer $R_{\text{TNR}}(T_i, R)$, $P_d(R_{\text{TNR}}, P_{\text{famin}})$

while($P_d > P_{d0}$)

```
{
R = R + R_step ;
computer R_TNR ( T_i, R ) ;
computer P_d ( R_TNR, P_famin ) ;
}
```

(4) Computer $P_{fa}(R_{\text{TNR}}, P_{d0})$

While($P_{fa} \leq P_{\text{famax}}$)

```
{
R = R + R_step ;
computer R_TNR ( T_i, R ) ;
computer P_fa ( R_TNR, P_d0 ) ;
}
```

Output $R_{\text{TNR}}(T_i, R)$

基于温度变化的阈噪比求解流程如图9所示。

3.2 变阈噪比仿真分析

基于表1中的参数,设定虚警概率范围 $P_{fa} = 10^{-5} \sim 10^{-3}$,探测概率 $P_d \geq 0.8$,依据图9流程,仿真了探测器温度 $T = [50\text{K} 60\text{K} 70\text{K} 80\text{K} 90\text{K} 100\text{K}]$ 时,变阈噪比方法求得的不同温度处的探测距离,结

果如图10所示。明显看出,在其他初始条件相等的情况下,采用变阈噪比方法求得的最远作用距离大于目前机载IRST采用的阈噪比值情况。

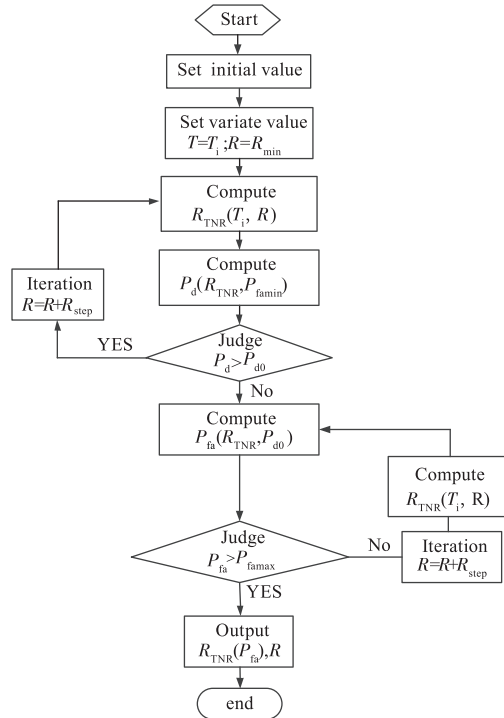


图9 基于温度变化的阈噪比求解流程图

Fig. 9 The threshold noise ratio solution process based on temperature changing

定义探测距离的相对增加率 ΔR 为:

$$\Delta R = \frac{R_{\text{优化}} - R_{\text{目前}}}{R_{\text{目前}}} \quad (17)$$

式中, $R_{\text{优}}$ 为变阈噪比求得的作用距离; $R_{\text{目前}}$ 为传统阈噪比求得的作用距离,表2列出了图10仿真中,不同温度对应的 ΔR 值。从表中可以看出,温度越高,探测距离相对增加率越高,说明变阈噪比的求解优势越明显。这主要是因为温度越高,IRST系统的探测性能越差,在探测概率满足指标要求的前提下,通过降低阈噪比值,增大作用距离的效果越明显。

表2 探测距离相对增加率

Tab. 2 Relative increase rate of detection range

温度/K	50	60	70	80	90	100
增加率/%	28.7	29.9	13.02	13.18	13.2	13.61

4 探测概率包线优化研究

探测概率包线是指机载IRST系统在作战环境中,考虑目标飞行速度、战场环境、探测概率、虚警概率等因素,我机在目标不同态势的最远作用距离。图11仿真了目标飞行速度 $Ma = 2$,大气透过率 $\tau_{\text{air}} =$

0.5, 探测概率 $P_d \geq 0.8$, 光学系统透过率 $\tau_0 = 0.965$, 阈噪比 ($P_{fa} = 10^{-4}$) 恒定时, 探测器温度 $T = [50 \text{ K } 70 \text{ K } 90 \text{ K}]$ 时,IRST 系统的最大探测距离包线。可以看出,随着温度的升高,探测概率包线迅速减小。说明机载IRST系统探测器温度对其作战效能的发挥有显著的影响。

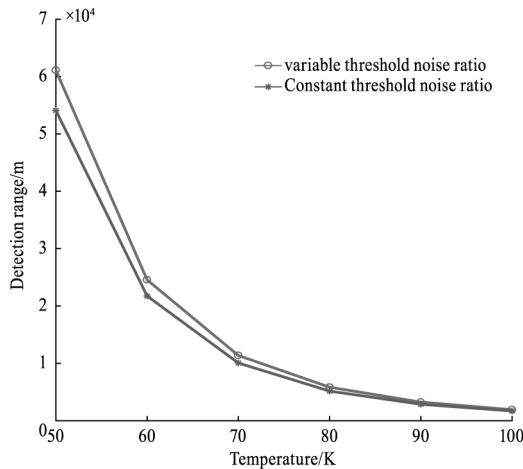


图 10 变阈噪条件下探测距离

Fig. 10 Detection range by the variable threshold noise ratio

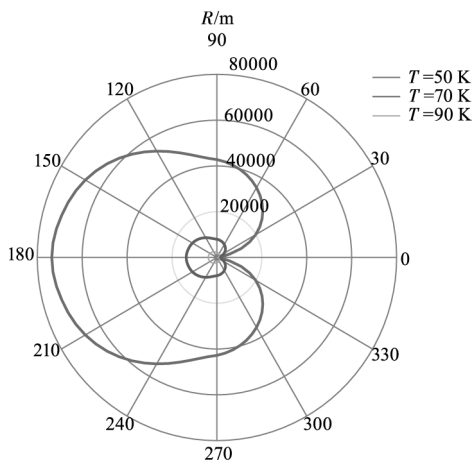


图 11 不同温度条件下的探测概率包线

Fig. 11 Detection probability envelope of different temperature

依据 3.10 节求解变阈噪比的方法,同样采用图 11 的仿真数据,虚警概率范围设置为 $P_{fa} = 10^{-5} \sim 10^{-3}$, 仿真得到探测器温度 $T = 50 \text{ K}$ 时,变阈噪比求得的探测概率包线如图 12 所示。可以看出,在变阈噪比条件下求解的探测距离包线范围比传统阈噪比条件下的包线范围明显增大,说明采用本文提出的随温度条件设置阈噪比的方法,在满足探测概率指标的要求下,与目前阈噪比方法相比,可明显增大机载IRST系统的探测距离。

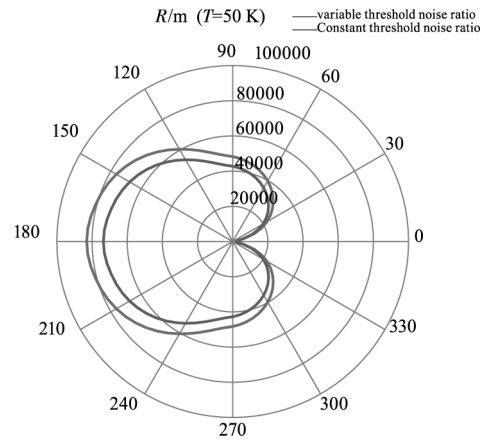


图 12 探测概率包线

Fig. 12 Detection probability envelope

5 结论

针对现阶段IRST系统点源探测研究忽略温度对探测距离影响的现象,文章将温度、探测概率、探测距离联合分析,提出了在作战过程中,依据温度变化动态设置阈噪比的思想。分析了温度变化对背景目标相对辐射度、大气透过率、IRST光学系统透过率、探测器比探测率四方面的影响,建立了探测概率模型,列出了依据温度变化求解阈噪比的具体步骤。仿真验证了机载IRST在探测过程中,依据不同温度动态改变阈噪比取值可以达到扩大探测概率包线的目的,说明所提方法具有可行性,为实战探测中机载IRST系统探测性能的提高提供理论依据。

参考文献:

- [1] Chen Li, Wu Zaobin, Wang Zhongxu. Research on the critical detection probability of optic-electric tracking systems [J]. Computer engineering and science, 2012, 34 (7): 182 - 189. (in Chinese)
陈黎,武兆斌,王中许. 光电跟踪系统临界探测概率研究[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34 (7): 182 - 189.
- [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] 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.
- [4] 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. (in Chinese)
王领,于雷,寇添,等.机载IRST系统最佳工作及探测概率包线研究[J].红外与激光工程,2016,45(5):0504006.
- [5] Kou R K, Wang H Y, Wu X M. Research on the best threshold noise ratio of airborne IRST system[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3):0304001. (in Chinese)
寇人可,王海晏,吴学铭.机载红外搜索跟踪系统的最佳阈噪比[J].光学学报,2017,37(3):0304001.
- [6] Wang Fang, Kou Tiao, Kou Renke, et al. Variable threshold noise ratio optimization of airborne IRST system detection probability envelope[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3):0304002. (in Chinese)
王芳,寇添,寇人可,等.变阈噪比优化机载IRST系统探测概率包线[J].光学学报,2019,39(3):0304002.
- [7] Wu Hanping. Infrared search system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013:217-239. (in Chinese)
吴晗平.红外搜索系统[M].北京:国防工业出版社, 2013:217-239.
- [8] Zhang Jianqi, Fang Xiaoping. Infrared physics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2011:133-134. (in Chinese)
张建奇,方小平.红外物理[M].西安:西安电子科技大学出版社,2011:133-134.
- [9] Wang Haiyan. Infrared radiation and application [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2014:40-51. (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,2014:40-51.
- [10] Wang Feixiang, Guo Jie, Xu Fangyu, et al. Calculation and measurement of infrared atmospheric transmittance at different altitudes[J]. Chinese Optics, 2019, 12(4):844-853. (in Chinese)
王飞翔,郭杰,许方宇,等.不同海拔地区大气透过率的计算和测量[J].中国光学,2019,12(4):844-853.
- [11] Nie Guangshu. External aeroballistics [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2022:9-10. (in Chinese)
聂光成.航空外弹道学[D].西安:空军工程大学, 2022:9-10.
- [12] Antoni Rogiski. Infrared detectors [M]. Beijing: China Machine Press, 2014:30-60. (in Chinese)
Antoni Rogiski.红外探测器[M].北京:机械工业出版社, 2014:30-60.