

## 机载红外搜索跟踪系统探测性能评测标定\*

王 领, 于 雷, 寇 添, 王海晏

(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系统(Infrared Search and Track,IRST)理论与实际战场探测能力之间的较大差异,提出了IRST系统探测性能评定的方法。对机载红外探测系统探测性能指标进行理论分析,选取探测点源目标的噪声等效辐照度作用距离模型进行分析改进;探讨作用距离与探测概率之间的关系;根据IRST系统工作方式,推导出系统物理扫描概率和目标发现概率计算公式;分析目标发现概率与系统作用距离以及载机速度之间的关系;搭建双余度反馈IRST系统探测概率测试平台,制定实验评测步骤,提出一种对探测系统性能进行评估的方法,该方法简单可靠。仿真实验结果表明,满足一定的探测概率下,系统作用距离极限可达到60km;通过半实物仿真平台的测试,实验结果较好地验证了所建模型的合理性。

**关键词:**红外辐射;作用距离;探测概率;最大似然估计;评估标定

**中图分类号:**TN929 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)05-192-07

## Evaluation and calibration of operational capability to airborne IRST system

WANG Ling, YU Lei, KOU Tian, WANG Haiyan

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

**Abstract:** Due to the difference between theory detection and in-battlefield detection ability of airborne IRST (Infrared Search and Track) system, the method of evaluation for detection system was put forward. Firstly, the theory aiming at operational capability of airborne infrared detection system was analyzed, especially the betterment of NEFD (Noise Equivalent Flux Density) operating range model, and the analysis of functional relationship between operating range and detection probability. According to the operation mode of IRST system, the computational formula of physical detection probability and target identification probability was deduced, and the target identification probability changing with operating range as well as speed was analyzed. Finally, the test platform of IRST system detection probability was set up and the experimental evaluation steps were made, and a simple and reliable method of evaluation and calibration was proposed. Simulation result shows that the operation range limitation of IRST system can reach 60km. Testing by semi-physical simulation, the rationality of the model is verified through the experimental conclusion.

**Key words:** infrared radiation; operating range; detection probability; maximum likelihood estimation; evaluation and calibration

近年来,在高技术和新型军事装备支撑下的战争对军事侦察与监视的能力和水平提出了越来越高的要求,而机载红外搜索跟踪系统(Infrared Search and Track,IRST)在基于光电探测的先进航空装备平台上占据着主体地位<sup>[1-2]</sup>。机载IRST系统具有分辨率高、探测距离远、全天候和抗干扰等诸多优势,这使得各军事强国致力于竞相研制新型红外搜索跟踪系统。

研制过程中,为保证武器装备能够满足作战能力要求,武器装备的试验和评估是研制的关键环节,也是发现问题和消除风险的有效手段<sup>[3]</sup>。

因此,本文针对机载IRST系统的探测性能评测问题,在深入分析IRST系统关键战术指标上,主要从红外辐射作用距离建模出发,把系统的探测能力标定问题归结为探测概率的研究,最后通过实验设定,给出作战环境下探测概率标定指标,从而更加合理地对新研IRST系统探测性能做出评定。

### 1 红外辐射作用距离分析

机载IRST系统探测性能中,作用距离是一项最为关键的战术指标,因而对IRST系统作用距离的分析是必不可少的环节,同时也为IRST系统探

\* 收稿日期:2014-11-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61172083)

作者简介:王领(1987—),男,陕西西安人,博士研究生,E-mail:wangling0413@163.com;

于雷(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:y10303@sohu.com

测性能的评定提供重要依据。国内外文献[4]~[10]对红外探测设备的作用距离模型都做了深入的研究和改进,按探测目标可分为点源目标和扩展源目标探测模型;按探测过程可分为水平探测和斜程探测模型;按探测原理可分为噪声等效温差模型、噪声等效辐照度(Noise Equivalent Flux Density, NEFD)模型、最小可探测温差模型<sup>[11]</sup>、对比度模型、光谱响应模型等。机载IRST系统在实战中最为有意义的是远距斜程探测,被探测对象在系统视场中一般为点源目标,而NEFD模型对实战环境点源目标作用距离工程估算更为准确,但其一般都是在静态环境下的理想估算,忽略一些重要战场环境因素。因此本文在NEFD模型上作进一步改进,改进模型融合了斜程探测因素,考虑了背景噪声和目标在探测器面上弥散斑的影响,这为模拟真实战场环境和在实验室进行试验提供了一定的理论支撑。

若在只有环境背景辐射的情况下,则探测器响应的瞬时电压为 $V_1$ ;在远距离情况下,目标并未完全充满探测器视场,目标某一波段的辐射强度在探测器上引起的瞬时电压为 $V_2$ 。再根据辐照度和辐射功率计算公式推导出相邻探测器电压差值为:

$$\Delta V = v_s = V_2 - V_1$$

$$= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (kI_t - I_b) \frac{\delta\tau_0\tau(R)A_0\mathfrak{R}}{R^2} \cdot d\lambda \quad (1)$$

式中: $I_t$ 为目标辐射强度; $I_b$ 为背景辐射强度; $\delta$ 为信号衰减因子; $\tau_0$ 为光学系统透过率; $\tau(R)$ 为大气斜程透过率; $A_0$ 为入瞳面积; $R$ 为红外作用距离; $k$ 为弥散系数, $k = \sigma_t^2/\sigma^2$ , $\sigma_t^2$ 为目标尺寸对探测器面张角的方差值; $\sigma^2$ 为实际像点弥散斑对系统张角的最大方差值; $\mathfrak{R}$ 为电压响应度, $\mathfrak{R} = (V_n D^*)/\sqrt{A_d \Delta f}$ , $V_n$ 为噪声电压, $D^*$ 为比探测率, $A_d$ 为探测器光敏面积, $\Delta f$ 为测量电路的频带宽。

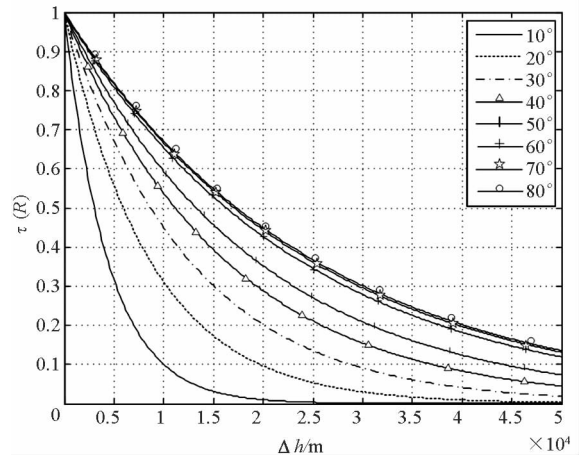
由式(1)可推导出IRST系统斜程探测作用距离表达式为:

$$R = \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (kI_t - I_b) \frac{\delta\tau_0\tau(R)A_0D^*}{(v_s/V_n) \cdot (A_d \cdot \Delta f)^{1/2}} \cdot d\lambda \right]^{1/2} \quad (2)$$

基于NEFD模型的作用距离简洁,更有利于工程估算,它与基于信噪比作用距离模型没有本质区别。式中 $\tau(R) = \exp[-\bar{\mu} \cdot \frac{\Delta h}{\sin\alpha}]$ 是作用距离的隐函数,需要迭代求解, $\bar{\mu}$ 为大气斜程平均衰减系数,其值跟大气能见距 $R_v$ 和辐射波段有关,

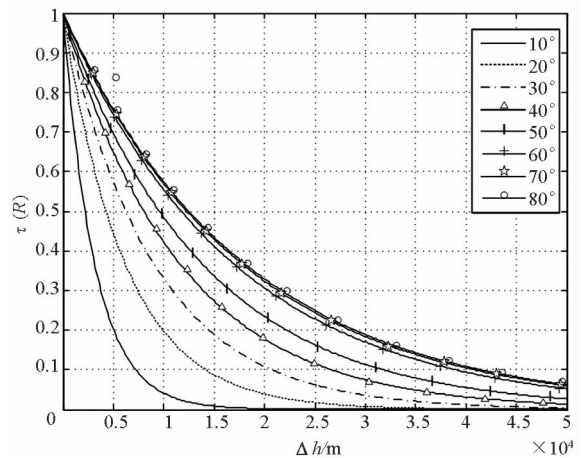
$\Delta h$ 表示战机与目标的高度差, $\alpha$ 为目标在战机方向的俯仰角。图1是根据我国冬夏季节不同的的大气衰减系数,辐射波段为 $3 \sim 5\mu\text{m}$ ,空气能见距为5km时的近地大气斜程透过率。图1(a)和图1(b)分别是冬季和夏季大气透过率变化曲线。

从图1可以看出,红外辐射在大气中的透过率随季节的变化而变化,总体上来讲,我国夏季的大气透射率相对低于冬季,这是因为夏季大气变化多端,常伴有雨、雾、多云天气,透射率受天气影响较大。图中红外辐射透射率随红外探测器与目标之间高度差 $\Delta h$ 的增大而减小;当高度差 $\Delta h$ 大于20km时,透射率随高度差的变化趋于平缓。



(a) 冬季大气透过率变化

(a) Atmospheric transmittance in winter



(b) 夏季大气透过率变化

(b) Atmospheric transmittance in summer

图1 不同高度差和目标仰角下的大气透过率  
Fig. 1 Atmospheric transmittance under different heights and elevations of target

## 2 探测概率模型

作用距离与探测概率、虚警率之间不是独立关系,作用距离存在一定的概率,虚警率也会随着

作用距离的变化而变化<sup>[12]</sup>。上面讨论了IRST系统作用距离战术指标,这一指标在战场环境下发挥的可靠性有多大,能否根据其指标顺利完成战术任务,如何熟练掌握新研IRST系统在这一指标下的实战性能,就需要结合这一指标对探测概率进行深入讨论。IRST系统的工作过程如图2所示。

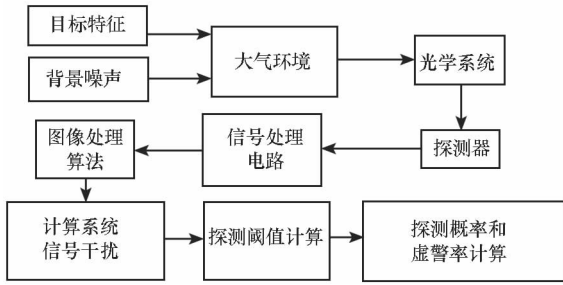


图2 IRST系统的工作过程

Fig. 2 Working process of IRST system

远距目标和背景辐射信息经过大气传输,进入IRST光学系统成像在探测器面上,信号经过电路滤波和有用信号提取处理后,图像处理器进行阈值选取与目标识别,最后由系统完成概率检测计算,并决定是否给出告警。从IRST系统工作过程可以知道,设备探测概率可分为物理扫描概率 $P_d$ 和目标发现概率 $P_r$ ,两环节,即IRST系统探测目标概率 $P = P_d \times P_r$ 。为了评定IRST系统作用距离的可靠性,下面主要根据以上所述的两个环节对IRST系统的探测概率进行分析。

### 2.1 物理扫描概率计算

物理扫描概率是指当IRST系统处于连续工作状态时,其光学视轴按照一定的规律在一定的空域范围进行机械扫描,目标出现在IRST红外系统视场时的概率,它主要与光学扫描方式以及扫描角速度有关<sup>[13]</sup>。系统物理扫描示意图如图3所示。

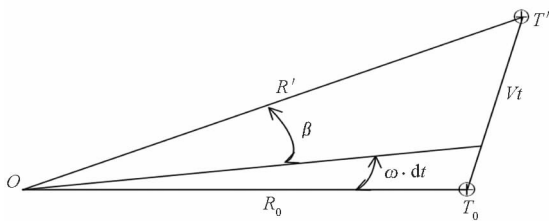


图3 IRST系统物理扫描过程

Fig. 3 Physical scansion process of IRST system

假如探测设备位于图中O处,距离其 $R_0$ 处的目标刚好被扫描到,经过微小段时间 $dt$ 之后,目标离开光学扫描视场,又以速度 $V$ 沿任意方向经过一小段时间 $t$ ,到达 $T'$ 处,转过 $\beta$ 角度,距离

为 $R'$ ,则目标处在 $T'$ 被扫描到的概率为:

$$P_d = (\beta + \omega \cdot dt) / 2\pi \quad (3)$$

$T_0$ 处的目标经过微小段时间 $dt$ 后所处的位置与O处的距离可近似看为 $R_0$ ,则根据图中参数之间关系,由三角余弦函数公式可以得到:

$$2R_0R'\cos\beta = R_0^2 + R'^2 - (Vt)^2 \quad (4)$$

对式(4)时间 $t$ 微分,得 $V^2t \cdot dt = R_0R' \sin\beta$ ,考虑到一小段时间内 $\beta \approx \sin\beta$ ,因此目标瞬时被扫描到的概率密度函数为:

$$P_d(t) = [(V^2t) / (R_0R') + \omega] / 2\pi \quad (5)$$

通过对式(5)进行积分和物理过程的推导,最终可以得到目标的物理扫描概率为:

$$P_d = 1 - \exp\left[-\int_{t_0}^t P_d(t) / T \cdot dt\right] \quad (6)$$

式中, $t_0$ 为扫描开始时间, $T$ 为扫描周期。

若探测距离 $R_0 = 20\text{km}$ ,目标速度为 $3Ma$ 时,系统的物理扫描概率与扫描角速度和时间的关系如图4所示。从图中看出,物理扫描概率随着时间的积累而迅速增大,在同一时间下,扫描角速度越大,物理扫描概率越高,但在25s之后,不同扫描角速度探测概率没有明显高低区别。

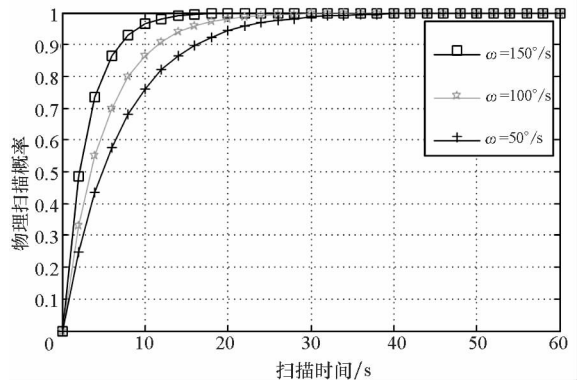


图4 物理扫描概率随时间和角速度的变化

Fig. 4 Physical scansion probability changing with scanning time and angular speed

### 2.2 目标发现概率计算

目标发现概率是指目标已经出现在系统视场中,通过IRST光学系统对红外辐射信息快速处理而被自动发现的概率。目标发现概率是从系统原理层次上进行分析的,它与作用距离、目标和背景辐射强度、目标速度、大气透过率状况、系统噪声等多种因素有关。

目标被发现的具体过程一般是预先给系统设定一个与概率相关的阈值,当外界目标辐射强度所引起探测器靶面的电压信号大于阈值时,并且经过图像处理器处理后,若目标真实存在,则可认

为目标被探测发现;若不是真目标,则是虚警<sup>[14]</sup>。由于整个探测发现过程随时都会受到随机噪声的干扰,因此识别过程需要用识别概率、虚警率这样的统计量来描述。系统中的随机噪声不随外界特定信号的变化而变化,这种随机噪声电压一般符合高斯分布,当外界目标和背景辐射信号进入系统之后,这种混合噪声信号仍然服从高斯分布,其电压信号均值为零,则IRST系统虚警概率为:

$$P_f = p(v_i > V_0)$$

$$= \int_{V_0}^{+\infty} p(v_i) dv = \frac{1}{\sqrt{2\pi}V_n} \int_{V_0}^{+\infty} \exp(-\frac{v^2}{2}) dv \quad (7)$$

式中,  $V_0$  为系统信号检测阈值,  $T_{NR} = V_0/V_n$  为系统阈噪比。实际在对新研红外设备的探测性能进行评估时,主要关注的是设备在一段时间内所引起的虚警次数,若信号的脉冲宽度为  $\tau_d$ ,则在单位时间  $t$  内所引起的虚警次数为平均虚警率<sup>[15]</sup>:

$$P_f(t) = \frac{1}{2\sqrt{3}\tau_d} \exp\left(-\frac{T_{NR}^2}{2}\right) \quad (8)$$

若外界辐射强度引起的探测器靶面电压响应为  $v_s$  时,则系统探测发现概率为:

$$P_r = p(v_i + v_s > V_0) = \int_{V_0}^{+\infty} p(v_i + v_s) dv$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{V_0 - v_s}{V_n}}^{+\infty} \exp(-\frac{v^2}{2}) dv \quad (9)$$

式中,  $S_{NR} = v_s/V_n$  为系统信噪比,由式(2)推导出:

$$S_{NR}(I_a, I_b, R) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (kI_a - I_b) \frac{\delta\tau_0\tau(R)A_0D^*}{R^2(A_d \cdot \Delta f)^{1/2}} d\lambda \quad (10)$$

图5是目标速度在  $5Ma$  下目标发现概率与作用距离间的关系,从图中可以看出目标发现概率总体上随着作用距离的增大而减小;在近距离情况下,目标发现概率相差不大,随着距离增加,发现概率出现很快的下滑趋势,直到  $70km$  以后几乎不能发现目标;在  $20 \sim 60km$  之间,目标发现概率与大气能见距  $R_v$  密切相关,同一距离下,大气能见距越低,目标发现概率较低;而这个范围又处在战机合适的作战半径内,因此大气状况的好坏直接影响到战机作战任务。

实际上,式(10)中  $I_a$  也是目标速度  $u$  的函数,目标速度越大,其蒙皮辐射强度越高,这致使目标某一辐射波段极易被探测,尤其是对高超音速目标探测时尤为明显。

图6反映的是目标发现概率在不同作用距离

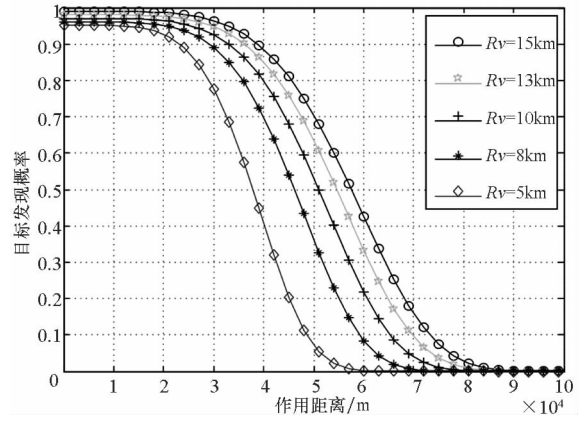


图5 目标发现概率随作用距离的变化

Fig.5 Target recognition probability changing with operating range

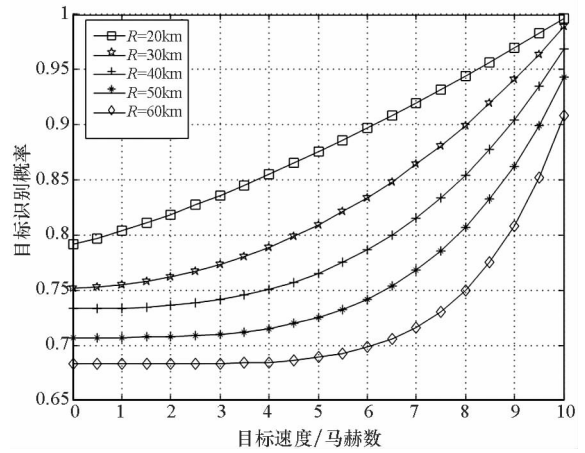


图6 目标发现概率随目标速度的变化

Fig.6 Target recognition probability changing with target speed

下随目标速度马赫数的变化,从图中看出,目标发现概率随着目标马赫数的增加而增加,而且马赫数越大,发现概率总体上变化越快,但在较近距离情况下,并没有明显地呈现出这样的规律,这是因为较近距离下,机载IRST较容易发现超音速目标,因此其发现概率随速度的变化较平缓。从图6还可以看出,在目标马赫数一定的情况下,距离越大,目标发现概率仍然越小,因为距离越远,大气透过率值越低,这极大地影响了机载IRST系统探测性能的发挥。

### 3 实验与评测标定

#### 3.1 实验平台搭建

以上从理论层面对IRST系统探测性能指标进行了分析,在实际作战环境中,这些性能指标是否可靠,还需要通过设定实验对IRST系统作进一步评估。在理论分析基础上,按照实际需求,搭建

实验平台,如图 7 所示。

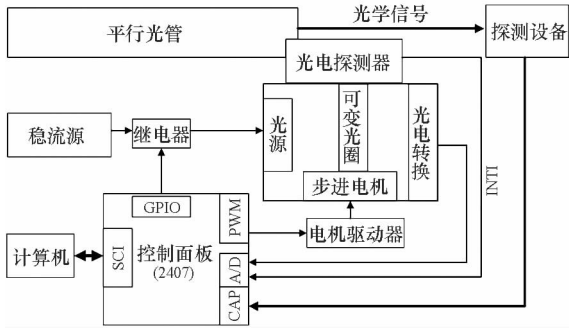


图 7 IRST 系统探测概率测试平台

Fig. 7 Test platform of IRST system detection probability

测试系统中,可控光源在控制模块的控制下,按照一定的规律变化;平行光管可将点光源变为平行光,模拟无穷远光源。从平行光管发出的光信号经双余度反馈环,一路反馈是光电探测组件模块所检测到的光信号直接反馈给控制模块,作为自闭环回路;另一路反馈则是被测的探测设备把接收到的光信号先转换为电信号,再反馈给控制模块,作为外闭环。控制模块记录下被测设备响应的次数  $N_r$ ,然后通过设定的试验次数  $N_0$  和统计学中最大似然估计法计算其探测概率,再与理论探测概率相比较,如果实验概率与理论概率的相对误差在一定范围内,则认为 IRST 系统探测性能稳定;如果实验概率远大于理论概率,则认为此 IRST 系统探测性能稳定可靠。实际上,实验评定结果往往需要进行多组测试。

### 3.2 探测能力评定步骤

实验室环境下模拟战场环境中 IRST 系统作战性能,需要实测数据计算每一个参数,利用上述实验平台,通过可控模拟目标源、双余度反馈,保证测试结果的可靠性和准确性<sup>[16]</sup>。下面是对 IRST 系统探测能力评估的实验步骤:

1) 预先给出 IRST 系统最大作用距离  $R_{max}$ 、光学系统孔径  $D$ 、透过率  $\tau_0$ 、测量电路频带宽  $\Delta f$ 、工作环境等参数;

2) 设定合适试验次数  $N_0$ ,并确定实验组数  $n$ 、背景辐射强度  $I_b$  和目标辐射强度  $(I_r)_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ ,再根据已知条件计算其他参数,如相应的探测概率  $p_0$ 、大气透过率  $\tau(R)$  等,并把这些参数输入计算机;

3) 利用 IRST 系统探测概率测试平台先对最大作用距离进行测试,记录每组实验被测设备响应次数  $N_r$ ,并根据统计学中最大似然估计法计算每组实验探测概率  $p_i$ ,同时计算均值  $\bar{p}_i$ ;

4) 利用得到的数据  $\bar{p}_i$  与  $p_0$  作比较,如果  $|\bar{p}_i - p_0|/p_0 \leq 5\%$  且  $\bar{p}_i \geq 85\%$ ,则 IRST 系统在  $R_{max}$  下能稳定工作;如果  $\bar{p}_i \gg p_0$  且  $\bar{p}_i \geq 95\%$ ,则 IRST 系统在  $R_{max}$  下工作稳定可靠;否则把  $R_{max}$  减小 5km 为  $R_1$ ,重复步骤 3),直到 IRST 系统在作用距离  $R_j = R_{max} - 5000j$  时,  $j = 1, 2, 3, \dots$ ,探测概率  $P_j$  符合步骤 4) 中假设要求为止,同时做出相应评定。

### 3.3 计算实例

假定所探测的目标为某高超音速飞行器,飞行高度为 20km;被探测角度为侧视  $45^\circ$ 。IRST 系统  $R_{max} = 50\text{km}$ ,扫描角速度为  $100^\circ/\text{s}$ ;光学系统孔径  $D = 0.5\text{m}$ ,透过率  $\tau_0 = 0.75$ ,像元尺寸为  $50\mu\text{m}$ ,比探测率  $D^* = 2.0 \times 10^{11} \text{cmHz}^{-1/2} \text{W}^{-1}$ ,系统测量电路频带宽  $\Delta f = 5.0 \times 10^3 \text{Hz}$ ,信号衰减因子  $\delta = 0.9$ ;设定探测器阈噪比  $T_{NR} = 5$ 。背景红外辐射强度  $I_b = 20\text{W}/\text{Sr}$ ,大气能见距  $R_V = 20\text{km}$ 。

根据已知条件计算出  $R_{max}$  下的探测概率  $p_0 = 0.81$ ,大气透过率  $\tau(R) = 0.78$ ,设定目标辐射强度  $(I_r)_i = 2.5 \times 10^3 - 500i (\text{W}/\text{Sr})$ ,并且把这些数据输入计算机,从而使计算机调控光源,使平行光管能够输出模拟外界辐射强度的光源。设定试验次数  $N_0 = 30$ ,实验组数  $n = 5$ 。通过实验,测得数据如表 1 所示。表 1 中探测概率  $p_i$  是由统计学最大似然估计法计算所得。每组实验数据可以看作是二点式分布,若用“1”表示有探测响应,“0”表示无探测响应,则母体  $X$  的分布为  $P\{X = x\} = p_i^x (1 - p_i)^{1-x} (x = 0, 1)$ 。取得子样记为  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N_0})$ ,则每组实验概率为:

$$P\{X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_{N_0} = x_{N_0}\} = p_i^{\sum_{i=1}^{N_0} x_i} (1 - p_i)^{\sum_{i=1}^{N_0} (1 - x_i)}$$

记  $L(p_i) = p_i^{\sum_{i=1}^{N_0} x_i} (1 - p_i)^{\sum_{i=1}^{N_0} (1 - x_i)}$ ,对  $L(p_i)$  求极值,得最大似然估计值  $\hat{p}_i = (\sum_{i=1}^{N_0} x_i)/N_0$ ,因而求得每组实验最大似然估计值如表 1 中  $p_i$  值所示。

表 1 探测概率实测数据

Tab. 1 Measured data of detection probability

	$(I_r)_i / (\text{w}/\text{sr})$	$N_0$	$(N_r)_i$	$p_i$
1	2500	30	23	0.76
2	2000	30	21	0.70
3	1500	30	20	0.67
4	1000	30	19	0.64
5	500	30	17	0.57

由表1实验数据求得 $\bar{p}_i = 0.69$ ,且 $|\bar{p}_i - p_0|/p_0 = 14.8\% \geq 5\%$ ,因此需要继续测试, $R_1 = R_{\max} - 5\text{km} = 45\text{km}$ ,测试步骤同上,实验数据结果如表2所示。

表2 探测概率实测数据

Tab.2 Measured data of detection probability

	$(I_t)_i/(w/sr)$	$N_0$	$(N_r)_i$	$p_i$
1	2500	30	28	0.93
2	2000	30	27	0.90
3	1500	30	24	0.80
4	1000	30	25	0.83
5	500	30	24	0.80

由表2实验数据求得 $\bar{p}_i = 0.85$ ,而 $R_1$ 对应的理论探测概率 $p_0 = 0.84$ 且 $|\bar{p}_i - p_0|/p_0 = 1.17\% \leq 5\%$ , $\bar{p}_i \geq 85\%$ ,则IRST系统能够稳定工作。从步骤3)继续进行测试,可以发现,当 $R_4 = 30\text{km}$ 时,理论概率探测 $p_0 = 0.89$ ,由表3数据得到 $\bar{p}_i = 0.96$ ,有 $\bar{p}_i \gg p_0$ 且 $\bar{p}_i \geq 0.95$ ,则IRST系统能够在 $R_4 = 30\text{km}$ 下稳定可靠工作,担负作战任务。

表3 探测概率实测数据

Tab.3 Measured data of detection probability

	$(I_t)_i/(w/sr)$	$N_0$	$(N_r)_i$	$p_i$
1	2500	30	29	0.97
2	2000	30	30	1.00
3	1500	30	29	0.97
4	1000	30	28	0.93
5	500	30	27	0.90

从以上评测和标定实验过程可以看出,实验结论同时也验证了本文所建模型的有效性,能够利用理论模型对机载IRST探测系统进行探测性能评估预测。

## 4 结论

本文所研究内容对于光电探测设备的评估、改进和生产定型能够提供一定的依据和参考价值。文中物理扫描概率和角速度之间的结论说明针对不同的扫描方式要选择合适的扫描角速度,以期达到最大的物理扫描概率;目标发现概率与作用距离间的结论则表明战机担负作战任务最好选择大气能见距高的时候;在静默攻击中,飞行员可在距离目标50km处开启IRST前视红外系统,

关闭雷达系统,进行相对隐身的战况决策。文中实验评测结论是在实验室环境下模拟战场环境所获得的,对于结论仍需要进一步完善实验设定以及评估标准;当建立了动态测试环境之后,可以对机载IRST系统作战性能进行动态测试,以提高对光电探测系统战时能力评估预测的准确性;当获得了大量外场测试实验数据之后,结合实验室模拟环境便可以对软件测试设备进行完善,达到机载光电系统探测概率自动测试的效果。

## 参考文献 (References)

- [1] 丁全心,刘华.光电探测与制导技术在机载成像系统中的应用与展望[J].红外与激光工程,2007,36(s2):7-14. DING Quanxin, LIU Hua. Perspective on photoelectric detection control and guide technique for airborne imaging systems[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007,36(s2):7-14. (in Chinese)
- [2] 陆君,吕彤光.光电探测技术在火控系统中的应用及发展[J].红外与激光工程,2012,41(4):1047-1051. LU Jun, LYU Tongguang. Application and development of optoelectronic detection technology in fire control system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012,41(4):1047-1051. (in Chinese)
- [3] 刘义,赵春娜,王雪松,等.一种反辐射武器作战效能评估方法[J].兵工学报,2011,32(3):321-326. LIU Yi, ZHAO Chunna, WANG Xuesong, et al. Weapons and equipment development demonstration[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(3):321-326. (in Chinese)
- [4] 金伟其,高绍姝,王吉晖,等.基于光电成像系统最小可分辨比度的扩展源目标作用距离模型[J].光学学报,2009,29(6):1552-1557. JIN Weiqi, GAO Shaoshu, WANG Jihui, et al. A model to predict range performance of imaging system for extended target based on minimum resolvable contrast[J]. Acta Optic Sinica, 2009, 29(6):1552-1557. (in Chinese)
- [5] Beier K, Gemperlein H. Simulation of infrared detection range at fog conditions for enhanced vision systems in civil aviation[J]. Aerospace Science and Technology, 2004, 8(1):63-71.
- [6] 贾庆莲,乔彦峰,邓文渊.周视搜索系统对点目标的作用距离分析[J].光学学报,2009,29(4):937-943. JIA Qinglian, QIAO Yanfeng, DENG Wenyuan. Analysis for point-target detection range of panoramic searching system[J]. Acta Optic Sinica, 2008, 29(4):937-943. (in Chinese)
- [7] Nijhawan O P. Range estimation of thermal imaging system from MRTD and MTF measurement[J]. Optik(Jena), 1994, 97(1):1-3.
- [8] 张宝辉,张俊举,常本康,等.红外探测器对飞行弹丸探测距离的仿真研究[J].兵工学报,2012,33(11):1319-1323. ZHANG Baohui, ZHANG Junju, CHANG Benkang, et al. Simulation on detection range of infrared detector for flying projectile[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(11):1319-1323. (in Chinese)
- [9] 何建伟,曹晨,张昭.红外系统对隐身飞机的探测距离分析[J].激光与红外,2013,43(11):1243-1247. HE Jianwei, CAO Chen, ZHANG Zhao. Analysis on

- operating range of a IR system for stealth aircraft[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(11): 1243 - 1247. (in Chinese)
- [10] 李力, 袁溯, 金伟其, 等. 基于最小可分辨对比度的近红外距离选通成像系统作用距离模型[J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3481 - 3487.
- LI Li, QIU Su, JIN Weiqi, et al. Operating distance model of near-infrared range gated imaging system based on minimum resolvable contrast[J]. *Acta Optic Sinica*, 2010, 30(12): 3481 - 3487. (in Chinese)
- [11] 赵妙娟, 车宏. 军用光电系统作用距离分析[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(s2): 501 - 503.
- ZHAO Miaojuan, CHE Hong. Analysis of the efficient distance of O - E system for military[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(s2): 501 - 503. (in Chinese)
- [12] 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 - 1434.
- 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 - 1434. (in Chinese)
- [13] 贾庆莲, 邓文渊. 红外警戒系统的探测概率计算[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 1856 - 1861.
- JIA Qinglian, DENG Wenyuan. Detection probability calculation of infrared warning system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1856 - 1861. (in Chinese)
- [14] 李克新, 张伟, 丛明煜, 等. 一种深空背景空间小目标条痕检测算法[J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 445 - 450.
- LI Kexin, ZHANG Wei, CONG Mingyu, et al. A streak detection algorithm of space target in deep space background[J]. *Acta Optic Sinica*, 2010, 30(2): 445 - 450. (in Chinese)
- [15] 李朝晖, 王冰, 陈明. 基于小波多尺度和最大似然法的红外目标探测[J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3404 - 3409.
- LI Chaohui, WANG Bing, CHEN Ming. Infrared target detection based on wavelet multi scale and maximum likelihood[J]. *Acta Optic Sinica*, 2009, 29(12): 3404 - 3409. (in Chinese)
- [16] 时成文, 隋强强, 石碧艳. 一种新型光电设备响应时间与探测概率自动测试系统[J]. *光电技术应用*, 2008, 23(1): 38 - 41.
- SHI Chengwen, SUI Qiangqiang, SHI Biyan. A new automatic test system of reaction time and detection probability for electro-optic equipments[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2008, 23(1): 38 - 41. (in Chinese)

## (上接第 168 页)

- [8] Palm S, Oriot H M, Cantalloube H M. Radargrammetric DEM extraction over urban area using circular SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(11): 4720 - 4725.
- [9] Ponce O, Prats-Iraola P, Pinheiro M, et al. Fully polarimetric high-resolution 3-D imaging with circular SAR at l-band[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(6): 3074 - 3090.
- [10] Ponce O, Prats P, Scheiber R, et al. Study of the 3-D impulse response function of holographic SAR tomography with multicircular acquisitions[C]//Proceedings of 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar, EUSAR, 2014: 1 - 4.
- [11] Ponce O, Prats-Iraola P, Scheiber R, et al. Polarimetric 3-D reconstruction from multicircular SAR at P-band[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(4): 803 - 807.
- [12] 洪文. 圆迹 SAR 成像技术研究进展[J]. *雷达学报*, 2012, 1(2): 124 - 135.
- HONG Wen. Progress in circular SAR imaging technique[J]. *Journal of radars*, 2012, 1(2): 124 - 135. (in Chinese)
- [13] 林赞, 谭维贤, 洪文, 等. 圆迹 SAR 极坐标格式算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(12): 2802 - 2807.
- LIN Yun, TAN Weixian, HONG Wen, et al. Polar format algorithm for circular synthetic aperture radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 2802 - 2807. (in Chinese)
- [14] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. The technology of radar imaging [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)
- [15] Prats-Iraola P, Rodriguez-Cassola M, De Zan F, et al. Efficient evaluation of fourier-based SAR focusing kernels[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(9): 1489 - 1493.