# 红外警戒系统的探测概率计算

## 贾庆莲,邓文渊

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

摘 要:提出了一种新的红外警戒系统的探测概率计算方法。针对给定参数的光学系统,建立了计算 过程的数学模型,模型显示未知目标在不同运动状态下的瞬时探测概率密度与警戒系统的转速、目标 运动速度及距离成正比关系。以人眼为接收器,分析了大气透过率、目标与背景对比度以及杂波对瞬 时探测概率的影响。给定目标的一般参数如亮度、飞行速度范围及与背景温差,给定系统的虚警率, 仿真实验结果表明:与传统的计算方法相比,该新方法在物理探测概率方面能较好地反应警戒设备的 性能,并且能反应目标距离、搜索时间、观察次数的影响。

关键词:探测概率; 红外警戒; 对比度; 目标距离; 大气透过率 中图分类号:TN216 文献标志码:A 文章编号:1007-2276(2011)10-1856-06

# Detection probability calculation of infrared warning system

#### Jia Qinglian, Deng Wenyuan

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A new calculating method of detection probability for IR warning system was proposed. The mathematical model of calculating process was set up corresponding to the optical system with given parameter. The model showed that the instant detection probability density of unknown target on the different motion condition had direct ratio relation with the rotational speed of IR warning system, kinematic velocity of target and distance between target and system respectively. Taking human eyes as the acceptor, the influence of atmospheric transmission, contrast and background clutter on instant detection probability was analyzed. Suppose that the main parameters such as target luminance, aviation rate, background temperature difference are known, the emulation is implied. The result shows that this new method has better performance to warning equipment compared with previous methods, and reflected target distance, searching time and observation frequency.

Key words: detection probability; IR warning; contrast; target distance; atmospheric transmission

作者简介:贾庆莲(1976-),女,副研究员,博士,主要从事光电测控方面的研究。Email:jqlian@sohu.com

收稿日期:2011-02-11; 修订日期:2011-03-16

基金项目:国家 863 计划

### 0 引 言

红外警戒系统以其被动方式探测、可全天候工 作、全方位(360°)、大俯仰角(几十度)以及多目标探 测等特点成为现代光电对抗战争中不可缺少的重要 系统之一<sup>[1]</sup>。自20世纪70年代以来,西方发达国家 就开始了红外警戒系统的研制工作<sup>[2]</sup>。由于当时技 术水平的限制,早期的系统造价高、形体笨重且虚警 率很高,所以得不到广泛的应用。进入20世纪90年 代以后,随着红外焦平面阵列探测器件、高速数字信 号处理器、图像处理算法等方面的技术有了很大的 提高,针对系统的大视场造成的各种信号的干扰,系 统既要保证对目标有足够大的探测概率又要有极小 的由干扰引起的虚警率<sup>[3-4]</sup>。

### 1 系统工作模型

红外警戒系统要完成对目标的探测,需要经过两 个步骤:(1)系统光轴在全方位的扫描运动;(2)接收 器在显示屏上的搜索运动。其搜索模型如图1所示, 系统具体参数如表1所示。在这过程中,一定方向上



Fig.1 Searching model for infrared warning system

表1系统参数

#### **Tab.1 System parameters**

Resolution	Pixel size/µm	Integral time/µs	Specific detectivity $(D^*)$ /cm · Hz <sup>1/2</sup> · W <sup>-1</sup>
480×6	38×28	20	2.0×1 011
Respond wavelength /µm	Focal/mm	Relative caliber	
7.7-10.3	120	1/2.62	

的目标与背景信息经过探测器的光学系统接收成像 在靶面上,信号处理器完成背景信号与杂波信号的 滤除以及目标信号的提取,图像处理器完成阈值的 选取、多个目标的分割与识别,成像显示器显示出目 标的位置与外形信息。

#### 2 探测概率计算模型

系统连续搜索时,光学系统视轴按一定规律在方 位和高低方向上对空域进行扫描,当目标出现在视场 中且被信号处理系统识别后,则表示为搜索到目标。 这其中包含两个环节:物理搜索和显示搜索<sup>[4-7]</sup>。因此, 搜索系统的探测概率 *P*<sub>d</sub> 应等于物理搜索中发现目 标的概率 *P*<sub>f</sub> 与显示搜索中识别目标的概率 *P*<sub>r</sub> 的乘 积,即 *P*<sub>d</sub>=*P*<sub>f</sub>×*P*<sub>r</sub>。

#### 2.1 物理探测概率计算

在实际物理搜索阶段,目标可能无法被探测到。 既可能是目标太远,也可能是目标未进入系统搜索区 域,或者是因为目标与搜索设备的介质模糊以致无法 完成目标成像。若目标处在搜索设备作用距离范围 内,则在物理搜索中,只考虑搜索区域和传输介质的 问题。在目标远离或接近搜索传感器及传输介质变化 的情况下,目标的瞬时搜索概率一般是变化的值。

在连续搜索扫描中,设 t 时目标能被探测到的概 率密度为  $p_i(t)$ ,此时的搜索区域为  $\Omega(t)$ ,则在  $t \rightarrow t + \Delta t$ 时间内,搜索区域变为  $\Omega(t) + \Delta \Omega(t)$ ,发现目标的概率 为  $p_i(t)\Delta t$ ,在  $\Delta t$  时间(很小)内,可以认为  $p_i(t)$ 为常 数,则从  $t \rightarrow t + \Delta t$  时,目标不能被探测的概率为:

$$P_{\Delta t}(t)\Delta t = \exp(-p_{\rm f}(t) \cdot \Delta t/\tau_{\rm d}) \tag{1}$$

在  $t+\Delta t$  时刻,目标未被探测到的概率为:

$$P_{(t+\Delta t)} = P_{(t)} \cdot P_{\Lambda t}(t) \tag{2}$$

则有关系式:

$$P_{(t+\Delta t)-P_{(t)}=P(t)(1-\exp(-p_{f}(t)\cdot\Delta t/\tau_{d}))$$
(3)

当  $\Delta t$ →0 时,

$$1 - \exp(-p_{\rm f}(t) \cdot \Delta t/\tau_{\rm d}) \approx p_{\rm f}(t) \cdot \Delta t/\tau_{\rm d} \tag{4}$$

得到方程

$$dP_{t} = p_{f}(t) dt / \tau_{d}$$
(5)

设在初始阶段,即搜索开始时目标不能被探测到,P\_(0)=1,则

$$P_{-}(t) = \exp\left(\int_{t=0}^{t} p_{\rm f}(t)/\tau_{\rm d} dt\right) \tag{6}$$

即在 t 时,目标被探测到的概率为:

$$p_{\rm f}(t) = 1 - P_{\rm t}(t) = 1 - \exp(\int_{t=t_0}^{t} p_{\rm f}(t)/\tau_{\rm d} dt)$$
 (7)

式中:t<sub>0</sub>为搜索开始时间。

设搜索设备处在中心 *T*<sub>0</sub> 处,当目标出现时,在 发现瞬时的可能随机位置为 *T'*,目标发现后,经过 一段微小时间 dt 随后又失去与目标的接触。设过了 时间 dt 后,目标离开了原来的位置,以速度 *V* 到达 *T'* 处,则目标的运动方向与 *T*<sub>0</sub>*T'*构成一个角度,则目 标处在 *T*<sub>0</sub> 的发现概率为:

 $P_{dt} = (\omega dt + \alpha)/2\pi \tag{8}$ 







则由图中关系可以得出: $\tan\alpha = \frac{Vdt}{R_0}$ 

在微小时间间隔内, $tan\alpha \approx \alpha$ ,则上式化简为:

$$P_{dt} = (\omega dt + \frac{V dt}{R_0})/2\pi$$

则目标瞬时探测概率密度为:

$$P_{\rm f}(t) = (\omega + \frac{V}{R_0}/2\pi) \tag{9}$$

(2) 目标沿径向运动,如图3所示。







(3) 目标沿任意方向运动,如图4所示。



图 4 目标任意方向运动示意 Fig.4 Sketch map for arbitrary movement of target

由图中关系,得:

$$V^2 t^2 = R_0^2 + R^2 - 2RR_0 \cos\alpha$$

对上式微分得:

$$2V^2tdt = 2RR_0 \sin\alpha$$

在微小时间间隔内有 
$$\sin \alpha \approx \alpha$$
,即: $\alpha = \frac{V^{T} t dt}{RR_{0}}$ ,则  $P_{d} =$ 

$$(\omega dt + \frac{V t dt}{RR_0})/2\pi_{\circ}$$

目标瞬时探测概率密度为:

$$P_{\rm f}(t) = (\omega + \frac{V^2 t}{RR_0})/2\pi$$
 (11)

#### 2.2 基于人眼的显示搜索性能模型

当目标出现在搜索视场内,而能被探测到或识 别出的概率称为识别概率。这种探测或识别的主体 者可以是人也可以是信号处理系统。在不同的虚警 率条件下,人眼和机器对信号的识别概率是不一样 的,机器识别速度高于人工,但信噪比要求也高于人 工判读。如果说物理探测概率只与目标在探测器上 成像有关,那么显示识别概率则受到目标与背景对 比度、人眼的识别阈值、图像中杂波的强度等有关。

当以人眼为接收设备时,假定观察者在一个固定的视线上观看光电成像系统的显示,并用相互独立的随机瞥视序列来描述复杂自然场景中的视觉搜索过程。假定一次瞥视中探测到给定目标的概率为常数 *P*<sub>0</sub>,则在一次瞥视中没有探测到目标的概率为 1–*P*<sub>0</sub>。则在 *n* 次连续凝视后探测目标的累积探测概率 *P*<sub>0</sub>为:

$$P_{\rm r}(n) = 1 - (1 - P_0)^n \tag{12}$$

对于实际系统,在显示搜索阶段影响到目标被 识别的因素有目标与背景的对比度、目标的最小辐 亮度、探测器的性能等,由于现在探测器的技术发展 越来越快,大多数探测器的性能已非常好,其对目标 的最小辐亮度要求也越来越低,因此,目标与背景的 对比度,或者说目标与背景的信噪比就成为影响到 显示搜索的一个很重要的因素。

这一因素对探测概率的影响表现在瞬时探测概 率 P<sub>0</sub> 的变化上,即 P<sub>0</sub> 不为常数。分析发现,其中不 同距离处的大气透过率不同,目标与背景的辐照度 比值等都可能影响到 P<sub>0</sub>。

设目标距离 R 处的大气透过率为  $\tau_{R}$ ,它对于红 外目标探测而言,影响到目标在探测器上显示的对 比度  $C_{R}$ 。对于固有对比度为  $C_{0}$ 的目标而言, $C_{R}$  是经 过衰减后的目标固有对比度:

$$C_{\rm R} = k \tau_{\rm R} C_0 \tag{13}$$

式中: k 为系数。

不同距离处的对比度 *C<sub>R</sub>* 必定会影响到目标的 瞬时探测概率 *P*<sub>0</sub>,设变化后的 *P*<sub>0</sub>为:

$$P_0(R) = P_0 K_{C_p} \tag{14}$$

式中: $0 < K_{C_{R}} < 1$ 为目标与背景对比度对探测概率的影响因子。

随着焦平面阵列器件的不断出现,像元分辨能 力更高,其显示目标的内部细节和更具体的周围环 境的能力也越强,这就意味着 NVESD 模型中关于 信号均匀分布和局部背景恒定不变的假设已不再适 用。由于背景杂波对搜索性能的直接影响是增加目 标的平均探测时间 *t*<sub>f</sub>,因而,对 *P*<sub>0</sub>的修正也必须考虑 背景杂波的影响。

S.R.Rotman<sup>[8]</sup>研究发现,当观察者已知目标的大概位置时(相当于类静态探测过程),其探测性能主要 由目标的局部对比度决定;当观察者没有目标位置的 先验知识的情况下,即处于目标搜索探测过程时,其 探测性能主要由图像的整体杂波等级来决定,因此, 搜索过程的探测概率和平均探测时间就是一个变值。

假设由杂波引起的瞬时概率密度的变化系数为 $K_s$ ,则修正后的 $P_0(R)$ 为:

$$P_0(R) = P_0 K_{C_0} K_{\rm S} \tag{15}$$

式中:0<K<1为背景杂波对探测概率的影响因子。

由上述分析可知,对于多个观察者,显示识别概 率为:

$$P_{\rm r} = P_{\infty} (1 - (1 - P_0(R))^n) \tag{16}$$

$$\vec{x} \oplus : P_{\infty} = \frac{\left[N/(N_{50})_{2D}\right]^{E}}{1 + \left[N/(N_{50})_{2D}\right]^{E}}, E = 2.7 + 0.7 \left[N/(N_{50})_{2D}\right], (N_{50})_{2D}$$

是 50% 捕获概率所要求的周期数<sup>[9]</sup>。

# 3 仿真计算

设空中目标为一个喷气式飞机,目标临界尺寸为 5 m<sup>2</sup>,喷口温度为1000K,喷口面积为0.35 m<sup>2</sup>,蒙皮的 发射率为0.87,在8~14  $\mu$ m 波段时其尾喷口的辐射强 度为5.5×10<sup>2</sup> J·s<sup>-1</sup>·sr<sup>-1</sup>,当飞机飞行速度不同时,其长波 波段的辐射亮度和辐射强度计算如表2所示。设目标 与背景的内在温度差为1.5 °C<sup>[8]</sup>,目标飞行速度在1*Ma* 左右,给定虚警概率为1 h/次。设目标处平流层大气温 度为15 °C,已知当太阳高角为20~40°时,天空亮度达 到最大值,约为0.2~0.6×10<sup>4</sup> J·s<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>·sr<sup>-1</sup>,背景辐亮度 为0.5×10<sup>4</sup> J·s<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>·sr<sup>-1</sup>, 按国际标准并考虑到电路处 理噪声及背景的不均匀等因素,取[*C*]=0.1。天气良 好状态下的大气消光系数为0.1。

设在搜索阶段,目标的蒙皮辐射为主要辐射源。 对于高速飞行目标,考虑蒙皮反射及上表计算蒙皮 辐射信息,可知其辐射强度在几十 J·s<sup>-1</sup>·sr<sup>-1</sup>左右。

表 2 喷气式飞机的长波段蒙皮辐射信息

Tab.2 Long-wave skin radiation of jet aircrafts

Velocity $/m \cdot s^{-1}$	Radiant luminance for $skin/J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	Radiant Intensity for skin/J·s <sup>-1</sup> ·sr <sup>-1</sup>
234	15.5	3.1
340	21.1	4.2
650	95	19
800	245.4	49.1

#### 3.1 物理发现概率计算

设周视红外搜索系统的扫描转速分别为 180 (°)/s, 120 (°)/s,60 (°)/s,计算其物理探测概率曲线如图 5 所示。



Fig.5 Physical detection probability in different scanning angle rate

图 5 为不同扫描角速度的物理探测概率。可以看

出,对于同样的探测概率,当扫描速度越高,系统扫 描探测到目标的时间越短,而当时间超过 30 s 时, 不同扫描速度的系统对目标的探测概率差别不大。 按照经典 NVESD 模型<sup>[8]</sup>对物理探测概率的计算,其 受搜索时间与大气透过率的影响,其物理探测概率 如图 6 所示。





比较图 5 及图 6 可以看出:在相同的搜索时间 处,NVESD 模型计算的物理探测概率明显低于文中 的计算。从物理搜索的原理来看,如果目标出现的概 率相同,系统扫描速度越大,在同样的时间内,原则 上应该有更大的概率发现目标,而 NVESD 模型却 未对此进行分析。

3.2 单目标显示概率计算

取良好天气时大气消光系数为 0.06, 恶劣天气时大气消光系数为 0.21, 计算不同距离处的目标显示概率如图 7 所示。当取不同观察次数时,目标显示搜索概率如图 8 所示。

从图 7 及图 8 中可以看出:大气透过率对目标 的显示探测概率影响较大,图中两种天气情况下的 大气透过率相差 3 倍左右。从图 7 可以看出,针对实 好天气情况下,目标的显示探测概率可以达到 0.5 以上,而不好的天气条件下,目标显示探测概率已变 得很小。当目标距离 30 km 时,良好天气情况下人 验条件提出的系统,当目标距离 30 km 时,在良眼 的显示识别概率可以达到 0.85 以上。从图 8 可以看 出,在良好天气情况下,随着观察次数的增加,目标 的显示探测概率增加迅速,而在不好天气情况下,无 论观察次数如何增加,其目标显示探测概率都不大, 而且变化差值也不大。



图 7 不同天气情况下显示探测概率与目标距离的关系 Fig.7 Display detection probability under different weather



图 8 不同天气情况下显示探测概率与观察次数的关系 Fig.8 Display detection probability under different weather vs observing times

如果按照经典 NVESD 模型对显示探测概率进 行分析,其显示搜索探测概率与目标距离的关系如 图 9 所示,与搜索时间的关系如图 10 所示。

从图 9 和图 10 可以看出:NVESD 模型的显示 搜索概率也随着目标距离的增加而降低,随着搜索 时间的增加而增加。与文中建立的模型相比,NVESD 模型计算的显示搜索探测概率明显较大。分析其原 因可以发现:由于文中建立的模型增加了背景杂波



图 9 NVESD 模型显示探测概率与目标距离的关系 Fig.9 Display detection probability of the NVESD model vs target distance



的影响,由此引起了显示搜索探测概率的降低,而这个 结果与参考文献 [7-8]中的相关数据更加接近。

#### 4 结 论

针对红外警戒系统,从物理搜索和显示搜索两 个阶段分析了其探测概率的计算方法。结果表明:在 物理搜索阶段扫描速率越高,在同样的搜索时间下, 其发现概率越大,发现概率随时间的增加而增加,但 到了一定时间后,发现概率的增加变得非常慢。在显 示搜索阶段,随着目标距离的增加,显示识别概率明 显下降。对于人眼来说,随着观察次数的增加,即搜 索时间的增加,显示识别概率明显增大。仿真实验在两 种天气情况下展开,其中良好天气情况下的大气消光 系数大约为恶劣天气的三分之一。

与经典 NVESD 模型相比,由文中所建模型计 算的物理探测概率要高,而显示搜索探测概率较低。 这是因为:文中把物理搜索的过程定义为与搜索设 备扫描速度相关的目标成像的概率,而显示搜索的 过程考虑了背景杂波、大气透过率等因素,由此导致 了上述的结果。

#### 参考文献:

[1] Gao Zhiyun, Gao Yue, Zhang Kaihua. Military Photoelectric

System [M]. Beijing: Beijing Institue of Technology Press, 1996: 192–196. (in Chinese)

高稚允,高岳,张开华.军用光电系统 [M].北京:北京理 工大学出版社,1996:192-196.

- [2] Shi Deheng, Hua Qifu, Huang Yijun. Current situation and development trend of infrared warning system [J]. *Infrared Technology*, 1995, 18(3): 1-4, 11. (in Chinese)
  施德恒,话启富,黄宜军. 红外警戒系统的现状与发展趋势[J]. 红外技术, 1995, 18(3): 1-4, 11.
- [3] Song Fenghua. Modern Space Photoelectric Systems and Applications [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004: 205-211. (in Chinese)
   宋丰华.现代空间光电系统及应用[M].北京:国防工业出版社, 2004: 205-211.
- [4] Shu Jinlong, Chen Liangyu, Zhu Zhenfu, et al. Current situation and development trend of infrared searching and tracking system [J]. *Modern Defence Technology*, 2003, 31 (4): 47-51.(in Chinese)
  舒金龙,陈良瑜,朱振福,等. 国外红外搜索跟踪系统的研

究现状与发展趋势[J]. 现代防御技术, 2003, 31(4): 47-51.

- [5] Qi Meng, Jin Weiqi, Wang Chunyong. Detection probability of IR panoramic searching system [J]. *Infrared Technology*, 2003, 25(2): 19-23. (in Chinese)
  祁蒙,金伟其,王春勇. 红外周视搜索系统的探测概率研究[J]. 红外技术, 2003, 25(2): 19-23.
- [6] Pei Xu, Ma Dongli. Calculation of detection and recognition probabilites of imaging infrared seekers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(3): 253-256. (in Chinese) 裴旭, 马东立. 红外成像导引头发现与识别概率的计算[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(3): 253-256.
- [7] Rosell F A. Review of the current periodic sensor models [C]// Proc of IRIS Imaging symposium, 1981.
- [8] Rotlnan S R. Evaluating human target acquisition using infrared sensor technology[C]//SPIE, 1995, 2426: 104–114.
- [9] Dudzik M C. Electro-Optical Systems Design, Analysis, and Testing [C]//The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook, USA: Infrared Information Analysis Center, 1993.