

## 空中红外目标探测的虚警源——飞鸟

方义强<sup>1,2</sup>, 樊祥<sup>1,2</sup>, 孙晓军<sup>1,2</sup>, 朱斌<sup>1,2</sup>, 陈晓斯<sup>1,2</sup>

(1. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽合肥 230037; 2. 合肥电子工程学院, 安徽合肥 230037)

**摘要:** 在对空中目标进行红外探测时, 飞鸟是一种重要的潜在虚警源, 其具有和目标相似的红外辐射特性。首先对飞鸟和空中目标在探测器上信号的计算方法进行了讨论, 重点考虑了红外系统的聚焦位置对成像的影响; 然后根据得到的公式分析了飞鸟飞行高度、面积和系统聚焦位置对飞鸟在探测器上信号的影响, 同样也对目标的信号进行了分析, 分析结果表明: 从信号的特征上不能区分飞鸟和目标; 最后提出了从速度的观点对飞鸟和目标进行区分的方法, 对飞鸟可能成为虚警源的概率公式进行了推导和示例计算, 从计算结果可以看到, 通过速度的差别, 可以在很大程度上对飞鸟进行剔除。

**关键词:** 红外目标探测; 飞鸟; 虚警源; 红外搜索跟踪

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)09-2819-08

## False alarm source in air IR target detection-birds

Fang Yiqiang<sup>1,2</sup>, Fan Xiang<sup>1,2</sup>, Sun Xiaojun<sup>1,2</sup>, Zhu Bin<sup>1,2</sup>, Chen Xiaosi<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China;

2. Electrical Engineering Institute of Hefei, Hefei 230037, China)

**Abstract:** When to detect an air target in infrared, bird is a potential source of false alarms, its IR characteristics are similar to the target's. The way to calculate the signal of the bird and target on the detector was firstly discussed, and the effects of the IR system's focus position were specially considered. Secondly, the influences that the flight altitude, area and focus position of system have on the bird's signal on the detector were analyzed according to the obtained formula. The signal of the target was also analyzed through the same way. The results show that the bird and the target can not be discriminated by the signal characteristics. Lastly, the way to discriminate the bird and the target was proposed based on the velocity, and the formula of probability that the bird would be treated as a false alarm was deduced and the calculation examples were done. From the results, it can be seen that the bird can be eliminated largely by the differences in velocity.

**Key words:** IR target detecting; bird; false alarm source;IRST

收稿日期: 2014-01-08; 修订日期: 2014-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(61307025; 61271376); 安徽省自然科学基金(1308085QF122; 1208085MF114)

作者简介: 方义强(1986-), 男, 博士生, 主要从事空中红外小目标探测方面的研究。Email: 490982172@qq.com

导师简介: 樊祥(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电对抗方面的研究。Email: FanXiangLXL@163.com

## 0 引言

红外搜索跟踪(IRST)系统在现代防空中的作用和地位越来越重要,一方面是由于单一的防空体系已不能满足现代战场的需求,如反辐射导弹(ARM's)的应用使得雷达设备应用大大受限,另一方面是红外探测技术的快速发展,使得 IRST 系统的性能得到保证<sup>[1-3]</sup>。

IRST 系统的使用目的要求系统能够尽快、尽早的发现目标,系统具有灵敏度高、探测率高、探测距离远、视场大等优点<sup>[3]</sup>。但是在保证高的探测概率的同时,不可避免的虚警概率也可能增大,一个 IRST 系统可能的虚警源就是飞鸟<sup>[4-5]</sup>,飞鸟在红外辐射能量、形状和运动特点上都和目标具有相似之处。而对于飞鸟引起的虚警问题,现有文献研究很少,因此文中就飞鸟对 IRST 系统形成虚警的问题进行了详细的讨论,并就降低虚警的问题提出了解决方法。

## 1 飞鸟信号的建模

假设在远红外波段(8~14 μm),飞鸟是温度为  $T$ ,发射率为  $\varepsilon_{\text{bird}}$  的朗伯辐射体,那么根据普朗克公式可以求得飞鸟的光谱辐射亮度为:

$$L_{\text{bird}}(\lambda) = \varepsilon_{\text{bird}} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} \quad (1)$$

式中: $\lambda$  为波长; $c_1$  为第一辐射常数, $c_1 = (3.741 5 \pm 0.000 3) \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$ ;  $c_2$  为第二辐射常数, $c_2 = (1.438 79 \pm 0.000 19) \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。设  $S_{\text{bird}}$  为飞鸟在探测方向的投影面积,则根据立体角投影定律可知, $l_{\text{bird}}$  距离上的飞鸟在光学系统接收面的照度为:

$$E_{\text{bird}}(\lambda, \theta) = \tau_{\text{bird}}(\lambda, \theta) \cdot L_{\text{bird}}(\lambda) \cdot \frac{S_{\text{bird}}}{l_{\text{bird}}^2} + E_r(\lambda, \theta) \quad (2)$$

式中: $\tau_{\text{bird}}(\lambda, \theta)$  为飞鸟和探测系统之间的大气透过率; $E_r(\lambda, \theta)$  为鸟飞和探测系统之间的路径辐射在光学系统接收面上的辐射照度。在理想几何成像条件下,即认为:

$$\frac{S_{\text{bird}}}{l_{\text{bird}}^2} = \left( \frac{l_{\text{bird}}}{f} \right)^2 \quad (3)$$

式中: $A_{\text{bird-d}}$  为飞鸟在探测器上的成像面积; $f$  为探测系统的焦距。那么可以得到飞鸟在探测器上的照度为:

$$E_{\text{bird}}'(\lambda, \theta) = \frac{\pi \tau_0}{4f_{\#}^2} \tau_{\text{bird}}(\lambda, \theta) \cdot L_{\text{bird}}(\lambda) + E_r'(\lambda, \theta) \quad (4)$$

式中: $\tau_0$  为光学系统的透过率,因为一般的光学系统平均透过率都在 0.9 以上,因此认为  $\tau_0$  是和波长无关的常量; $f_{\#} = f/D$ ,  $D$  为光学系统口径; $E_r'(\lambda, \theta)$  为探测器像元上接收的路径辐射形成的照度。

前面通过理想几何成像条件下得到的飞鸟在探测器上的照度公式,但是实际上的成像和系统的设置是有关系的。由于红外探测系统的探测对象(飞机、导弹等)距离系统很远,因此要求红外系统聚焦于较远处,而飞鸟一般只能在较近的距离上成像,那么此时飞鸟的成像尺寸不能认为是理想几何条件下的成像。

如图 1 所示,光学系统聚焦于  $x_f$  处,并将该平面称为对准平面,与对准面对应的为景象平面,距离

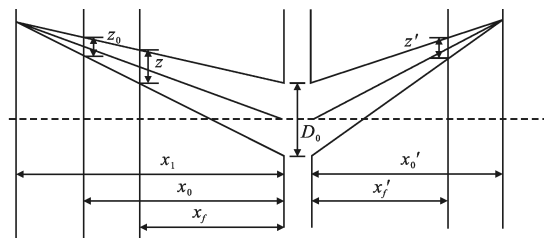


图 1 成像示意图

Fig.1 Sketch map of imaging

光学系统出瞳  $x_f'$ <sup>[6]</sup>。将设线度为  $z_0$  的目标远离光学系统距离为  $x_0$ , 目标和光学系统入瞳延长线相交于一点,假设该点所在平面距离光学系统入瞳  $x_1$ 。那么可以得到:

$$\frac{z_0}{D_0} = \frac{x_1 - x_0}{x_1} \quad (5)$$

$$\frac{z}{D_0} = \frac{x_1 - x_f}{x_1} \quad (6)$$

$$z' = \beta z \quad (7)$$

式中: $\beta$  为景象平面和对准平面之间的垂轴放大率,由牛顿公式可以得到:

$$\beta = \frac{f}{x_f - f} \approx \frac{f}{x_f} \quad (8)$$

联立 4 个方程可以得到目标在景象平面上像的大小为:

$$z' = D_0 f \left( \frac{1}{x_f} - \frac{1}{x_0} \right) + \frac{f}{x_0} z_0 \quad (9)$$

以上考虑的是目标位于对准平面外侧,同时考虑目标位于对准平面内侧时,将公式表示为:

$$z'(x_0, x_f) = Df \left| \frac{1}{x_f} - \frac{1}{x_0} \right| + \frac{f}{x_0} z_0 \quad (10)$$

从公式中可以看到, 当被成像的物体位于对准平面时, 有:

$$z'(x_f, x_f) = \frac{f}{x_0} z_0 \quad (11)$$

为了能够更为直观地看到通过公式(10)和(11)的差别, 下面采用典型的数据进行计算和分析。假设探测系统的光学孔径  $D_0=120$  mm, 焦距  $f=220$  mm; 系统聚焦于  $x_f=1$  km 处; 被探测目标的距离范围为 5~50 km, 目标的线度为 10 m; 飞鸟的距离范围为 10~500 m, 飞鸟线度为 6 cm。那么分别代入公式(10)和(11)可以得到两种计算条件下的成像尺寸如图 2、图 3 所示。其中虚线为通过公式(11)计算得到的曲线, 即理想成像条件的成像尺寸曲线; 实线为通过公式(10)计算得到的曲线, 即考虑系统聚焦位置时得到的曲线。

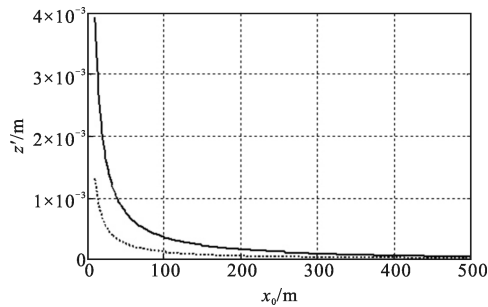


图 2 飞鸟的成像尺寸  
Fig.2 Imaging size of bird

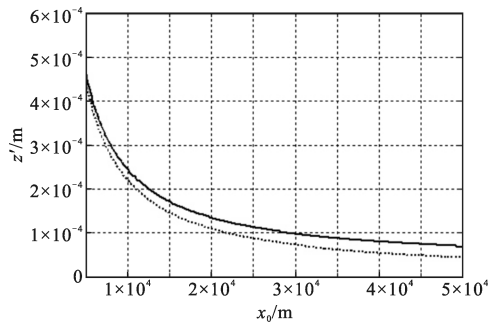


图 3 目标的成像尺寸  
Fig.3 Imaging size of target

假设用  $e(x_0) = \frac{z'(x_0, x_f) - z'(x_f, x_f)}{z'(x_0, x_f)}$  来表示图 2、图 3

中的误差, 则可以得到相应的误差曲线图如图 4、图 5 所示。

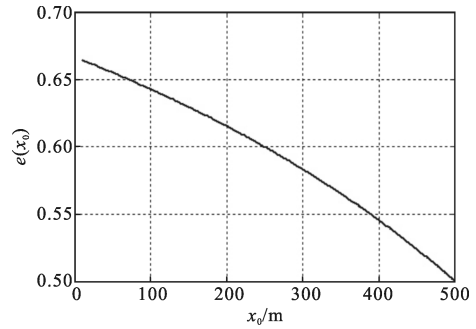


图 4 飞鸟的误差曲线

Fig.4 Error curve of bird

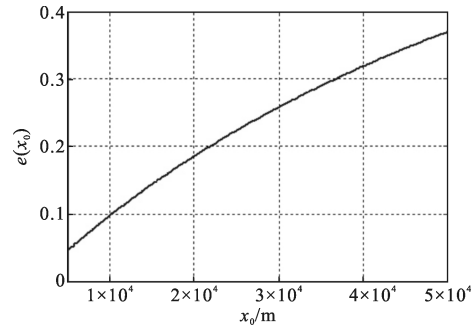


图 5 目标的误差曲线

Fig.5 Error curve of target

从图 2~图 5 可以看到, 无论是飞鸟还是目标, 考虑系统实际的聚焦位置时, 其实际成像尺寸和理想情况下的成像尺寸, 都存在一定的误差, 其中飞鸟在 10~500 m 距离范围内的误差在 50% 以上, 而目标在 5~50 km 的距离范围内的误差也在 5% 以上, 飞鸟和目标在两种情况下的误差都随着它们远离系统的聚焦位置(对准平面)而增大。因为误差比较大, 因此需要将公式(3)修正为:

$$\frac{S_{\text{bird}}}{A_{\text{bird-d}}} = \frac{1}{\left( \frac{Df}{\sqrt{S_{\text{bird}}}} \left| \frac{1}{x_f} - \frac{1}{l_{\text{bird}}} \right| + \frac{f}{l_{\text{bird}}} \right)^2} \quad (12)$$

那么结合公式(2)可以得到飞鸟在探测器上的辐射照度为:

$$E_{\text{bird}}(\lambda, \theta) = \frac{\tau_{\text{bird}}(\lambda, \theta) L_{\text{bird}}(\lambda) \tau_0 A_0}{2} + E_r'(\lambda, \theta) \quad (13)$$

$$\left( \frac{Df}{\sqrt{S_{\text{bird}}}} \left| \frac{l_{\text{bird}}}{x_f} - 1 \right| + f \right)$$

式中:  $A_0$  为探测器光学系统面积。如果假设环境为晴空环境, 那么背景辐射只由大气辐射组成, 同理可以得到飞鸟处的大气背景辐射在探测器上的辐射照度为:

$$E_{\text{sky}}(\lambda, \theta) = \frac{\tau_{\text{bird}}(\lambda, \theta) L_{\text{sky-b}}(\lambda, \theta) \tau_0 A_0}{2} + E_r'(\lambda, \theta) \quad (14)$$

$$\left( \frac{Df}{\sqrt{S_{\text{bird}}}} \left| \frac{l_{\text{bird}}}{x_f} - 1 \right| + f \right)$$

式中:  $L_{\text{sky-b}}(\lambda, \theta)$  为飞鸟所在处天空大气背景的方向光谱辐射亮度, 由于认为大气是充满整个视场的, 因此大气对应的面积  $S_{\text{sky}}$  为:

$$S_{\text{sky}} = A_d \left( \frac{l_{\text{bird}}}{f} \right)^2 \quad (15)$$

式中:  $A_d$  为探测器的面积。将公式(15)代入公式(14)可得:

$$E_{\text{sky}}(\lambda, \theta) = \frac{\tau_{\text{bird}}(\lambda, \theta) L_{\text{sky-b}}(\lambda, \theta) \tau_0 A_0}{2} + E_r'(\lambda, \theta) \quad (16)$$

$$\left( \frac{D_0 f^2}{\sqrt{A_d}} \left| \frac{1}{l_{\text{bird}}} - \frac{1}{x_f} \right| + f \right)$$

因此可以得到飞鸟和其所所在背景在探测器上形成的辐射照度差  $\Delta E_{\text{bird}}(\lambda, \theta)$ , 如公式(17)所示。同理可得, 对于一个距离探测器  $l_t$  的目标, 其在探测器上所形成的辐射照度和大气背景的辐射照度差如公式(18)所示。

$$\Delta E_{\text{bird}}(\lambda, \theta) = \tau_{\text{bird}}(\lambda, \theta) \tau_0 A_0$$

$$\left\{ \frac{L_{\text{bird}}(\lambda)}{\left( \frac{D_0 f^2}{\sqrt{S_{\text{bird}}}} \left| 1 - \frac{l_{\text{bird}}}{x_f} \right| + f \right)^2} - \frac{L_{\text{sky-b}}(\lambda, \theta)}{\left( \frac{D_0 f^2}{\sqrt{A_d}} \left| \frac{1}{l_{\text{bird}}} - \frac{1}{x_f} \right| + f \right)^2} \right\} \quad (17)$$

$$\Delta E_t(\lambda, \theta) = \tau_t(\lambda, \theta) \tau_0 A_0$$

$$\left\{ \frac{L_t(\lambda)}{\left( \frac{D_0 f^2}{\sqrt{S_t}} \left| \frac{l_t}{x_f} - 1 \right| + f \right)^2} - \frac{L_{\text{sky-t}}(\lambda, \theta)}{\left( \frac{D_0 f^2}{\sqrt{A_d}} \left| \frac{1}{x_f} - \frac{1}{l_t} \right| + f \right)^2} \right\} \quad (18)$$

文中主要关注目标和飞鸟在  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  的辐射, 因此对公式(18)在该波段上积分, 得到  $\Delta E_{\text{bird}}(\lambda, \theta)$ 、 $\Delta E_t(\lambda, \theta)$  的波段量  $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$ 、 $\Delta E_t(\theta)$  分别为:

$$\Delta E_{\text{bird}}(\theta) = \int_{8 \mu\text{m}}^{14 \mu\text{m}} \Delta E_{\text{bird}}(\lambda, \theta) d\lambda \quad (19)$$

$$\Delta E_t(\theta) = \int_{8 \mu\text{m}}^{14 \mu\text{m}} \Delta E_t(\lambda, \theta) d\lambda \quad (20)$$

## 2 飞鸟和目标信号的计算、分析与结论

### 2.1 飞鸟信号计算与分析

可以通过代入典型数据, 来计算  $\Delta E_{\text{bird}}(\lambda, \theta)$  的空间和光谱分布情况。同样假设探测系统的光学孔径  $D_0 = 120 \text{ mm}$ , 焦距  $f = 220 \text{ mm}$ ; 系统聚焦于  $x_f = 1 \text{ km}$  处。并假设飞鸟的面积  $S_{\text{bird}} = 0.004 \text{ m}^2$ , 发射率为 0.8; 光学系统透过率为 0.9。假设飞鸟的飞行高度分别为  $10 \text{ m}$ 、 $20 \text{ m}$ 、 $30 \text{ m}$ 、 $50 \text{ m}$ , 那么可以计算得到不同飞行高度时在  $60^\circ$  天顶角方向的光谱曲线如图 6 所示, 图中曲线由上至下依次对应飞鸟高度为  $10 \text{ m}$ 、 $20 \text{ m}$ 、 $30 \text{ m}$ 、 $50 \text{ m}$ , 因为选取计算的飞鸟高度差别不大, 几

种情况下得到的结果也比较相近。不同飞行高度时  $\Delta E_{\text{bird}}(\lambda, \theta)$  在  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  波段的积分量  $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$  随天顶角的变化曲线如图 7 所示, 以图的左侧为准, 图中实曲线由上至下依次对应为飞鸟高度  $10 \text{ m}$ 、 $20 \text{ m}$ 、 $30 \text{ m}$ 、 $50 \text{ m}$ 。

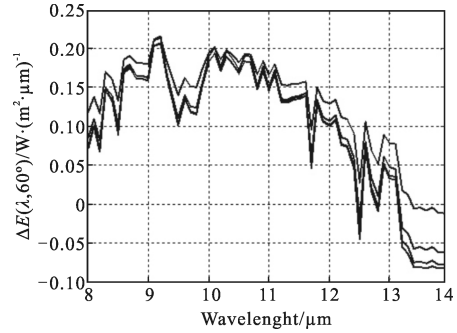


图 6  $\Delta E_{\text{bird}}(\lambda, \theta)$  在  $60^\circ$  天顶角方向的光谱曲线

Fig.6 Spectral curve of  $\Delta E_{\text{bird}}(\lambda, \theta)$  in the altitude angle of  $60^\circ$

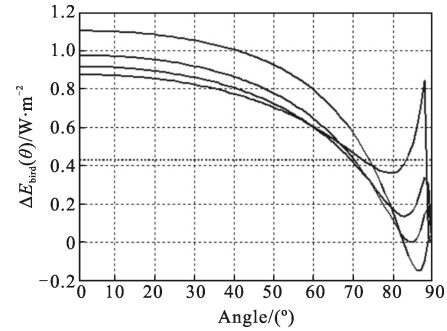


图 7  $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$  随天顶角的变化曲线

Fig.7 Change of  $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$  by altitude angle

下面主要对图 7 的曲线进行分析, 从曲线中可以看到:  $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$  在很大范围内随着天顶角的增大而减小, 一方面因为随着天顶角的增大, 大气辐射增强, 而且由于目标的飞行高度是一定的, 因此随着天顶角的增大, 飞鸟的距离也就相应增大, 那么飞鸟和探测器之间的大气透过率  $\tau_{\text{bird}}(\lambda, \theta)$  减小, 这两方面的因素会导致  $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$  随着天顶角的增大而减小; 另一方面, 可以由公式(13)看到, 当飞鸟的位置在系统和系统对准面之间时, 即  $l_{\text{bird}} \leq x_f$  时, 距离的增加会使飞鸟的信号增强, 结合图 2 也可以看到, 随着飞鸟距离的增加, 飞鸟逐渐靠近系统的对准面, 使得飞鸟的成像面积减小, 能量得到集中, 因此飞鸟的信号会得到增强,  $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$  将增大。由于开始时, 造成  $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$  减小的两方面因素要强于使  $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$  增大的因素, 因此开始时,  $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$  随着天顶角的增大而减小。同时图



中的曲线还显示,当 $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$ 随着天顶角减小到某一大的角度后, $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$ 开始增大,很显然此时造成 $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$ 减小的两方面因素要弱于使 $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$ 增大的因素。另外一个明显的特征是,曲线在末端大的天顶角( $>85^\circ$ )时, $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$ 又减小,根据公式(13)可以得到,由于此时飞鸟距离探测系统的距离已经超过了探测系统的聚焦位置,那么随着距离的增加,飞鸟将远离对准平面,从而导致飞鸟的成像面积增大,能量被分散,飞鸟的信号减弱,再加上大气辐射随着天顶角增大而增大、飞鸟和探测器之间的大气透过率 $\tau_{\text{bird}}(\lambda, \theta)$ 随着天顶角的增大而减小两方面的原因,三个原因都将导致 $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$ 的减小,因此在曲线的末端 $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$ 的值骤减。

接下来讨论一下系统对飞鸟的探测距离,从前期的工作中已经得到典型的探测器实现对目标的探测所需的最小信号照度为 $\Delta E_{\text{min}}'(\theta)=0.43 \text{ W/m}^2$ 。图7中的虚线为最小信号照度的值,对应于飞鸟高度10m、20m、30m、50m, $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$ 第一次减小到 $0.43 \text{ W/m}^2$ 以下的角度分别为 $74.05^\circ$ 、 $70.21^\circ$ 、 $69.35^\circ$ 、 $72.45^\circ$ ,那么可以求得这些角度时飞鸟距离探测器的直线距离为32m、59m、85m和166m。可以看到,随着飞鸟高度的增加,飞鸟的探测距离增加。另外,从曲线的变化趋势上可以看到,当飞鸟高度高于一定值时,对应的 $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$ 第一次减小到最小信号照度以下后,还会再次回到最小信号照度值以上,甚至不会出现前述的第一次减小到最小信号照度,然后在更大的天顶角上减小到最小可探测信号照度值以下。将166m代入公式(12)可以得到此时飞鸟在探测器上的成像面积为 $3.85 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ ,相当于4个像素的大小(相对于 $30 \mu\text{m}$ 尺寸的探测器单元),说明此时飞鸟在探测器上的像为一个小目标,若考虑弥散等非线性因素的影响,那么系统对飞鸟的探测距离还将小于前面得到的值,这里不再做深入讨论。

很显然,飞鸟的面积也会决定系统对飞鸟的探测距离,图8为代入不同的飞鸟面积得到的 $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$ 随角度的变化曲线,此时飞鸟高度取10m,其他参数不变。图中实曲线由上至下分别对应飞鸟的面积为 $0.008 \text{ m}^2$ 、 $0.004 \text{ m}^2$ 、 $0.002 \text{ m}^2$ 和 $0.001 \text{ m}^2$ 。从图中可以看到,随着飞鸟面积的增加, $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$ 第一次减小到最小信号照度以下对应的天顶角增大,从而系统对飞鸟的探测距离增加。另外可以判断得到的是,该

天顶角增大的速度随着飞鸟面积的增加而减小,且随着飞鸟面积的增大,该天顶角将始终存在,即对飞鸟的探测距离是有限的,而当飞鸟面积减小时,该天顶角可能不存在,如图中的飞鸟面积为 $0.001 \text{ m}^2$ 对应的曲线,那么说明此时飞鸟在各个角度都将探测不到。

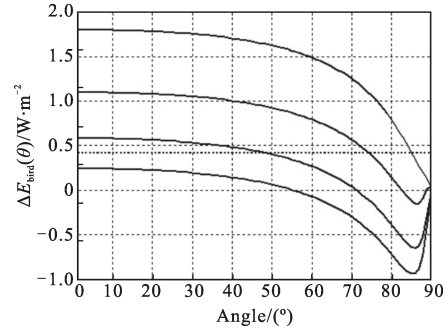


图8 不同飞鸟面积时的 $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$

Fig.8  $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$  in different bird areas

图9为不同系统聚焦位置时得到的 $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$ 随天顶角变化的曲线,计算中取飞鸟高度为10m,飞鸟面积为 $0.004 \text{ m}^2$ ,图中实曲线由上至下依次对应系统聚焦位置为200m、500m、1000m和2000m。可以看到,随着系统聚焦位置的改变, $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$ 将主要在大天顶角位置处变化较大,容易得到:随着系统焦距的增加,飞鸟的可探测距离减小。因此,从减少飞鸟对目标干扰的角度来说,需要增大系统的焦距,使飞鸟的可探测距离减小。

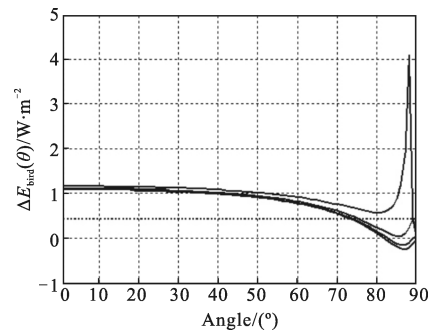


图9 不同系统聚焦位置时的 $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$

Fig.9  $\Delta E_{\text{bird}}(\theta)$  in different focus positions

## 2.2 目标信号计算与分析

为了比较目标和飞鸟,采用同样的步骤对目标在不同飞行高度、不同目标面积以及不同系统焦距情况下目标的 $\Delta E_r(\theta)$ 随角度的分布情况进行讨论。对于目标,这里主要讨论其蒙皮的红外辐射,和飞鸟不同的是,目标蒙皮的温度不恒定,需要根据目标的

环境温度和飞行速度来确定。同样在中纬度夏季大气模式下,可以计算得到目标在各种情况下  $\Delta E_t(\theta)$  随角度的分布曲线如图 10~12 所示。其他基本参数为:目标飞行速度为  $0.9Ma$ ,目标蒙皮发射率为  $0.9$ ,系统参数和飞鸟计算时相同。

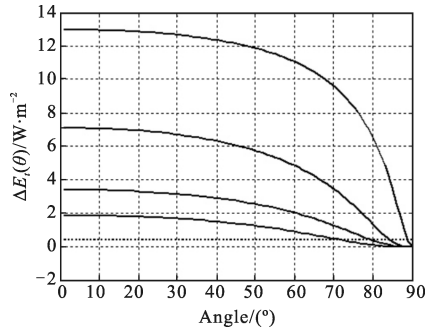


图 10 不同目标高度的  $\Delta E_t(\theta)$

Fig.10  $\Delta E_t(\theta)$  in different target altitudes

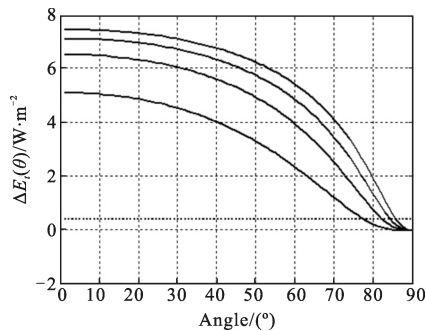


图 11 不同聚焦位置时的  $\Delta E_t(\theta)$

Fig.11  $\Delta E_t(\theta)$  in different focus positions

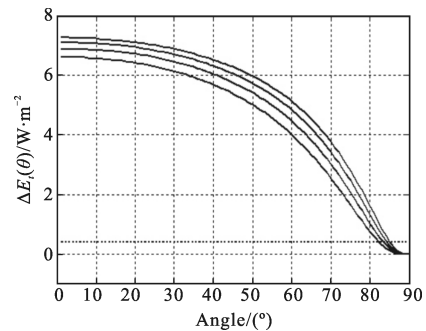


图 12 不同目标面积时的  $\Delta E_t(\theta)$

Fig.12  $\Delta E_t(\theta)$  in different target areas

图 10 为不同目标高度时的计算结果,此时系统焦距设置为  $1000m$ ,目标面积规定为  $A_t^0(\theta)=16l\cos(\theta)+14\sin(\theta)$ ,并将该面积定为计算的基准面积。图中曲线由上至下依次对应目标高度  $1km$ 、 $5km$ 、 $10km$  和  $20km$ ,可以看到,  $\Delta E_t(\theta)$  随着天顶角角度的增大和目标高度的增大而减小,4 种不同高度下  $\Delta E_t(\theta)$  减小到

最小信号照度以下对应的天顶角分别为  $88.8^\circ$ 、 $84.2^\circ$ 、 $79.2^\circ$  和  $71.2^\circ$ ,可以得到系统对目标的探测距离分别为  $47.75km$ 、 $49.39km$ 、 $53.37km$  和  $62.03km$ ,同样为了方便分析,这里没有考虑弥散的影响,当考虑弥散时,系统对目标的探测距离将明显减小<sup>[7]</sup>。

图 11 为不同系统聚焦位置的计算结果,此时目标面积仍设置为  $A_t^0(\theta)$ ,目标高度设置为  $5km$ ,图中曲线由上至下分别对应于系统的焦距为  $2000m$ 、 $1000m$ 、 $500m$  和  $200m$ ,可以看到,随着系统聚焦距离的减小,  $\Delta E_t(\theta)$  减小,同样可以得到不同焦距下的系统对目标的探测距离分别为  $64.88km$ 、 $49.39km$ 、 $36.11km$  和  $22.71km$ ,可见系统的聚焦位置将严重影响系统对目标的探测距离,聚焦于  $2000m$  和  $200m$  处的探测距离相差近 3 倍,因此,从目标探测的角度来说,也需要增大系统的聚焦距离,使系统对目标的探测距离增加。

图 12 为不同目标面积的计算结果,此时目标高度设置为  $5km$ ,系统焦距设置为  $1000m$ ,图上实曲线由上至下依次对应目标的面积为  $0.25A_t^0(\theta)$ 、 $0.5A_t^0(\theta)$  和  $2A_t^0(\theta)$ 。可以看到,随着目标面积的减小,  $\Delta E_t(\theta)$  也减小,但是减小的幅度相对较小。

以上对飞鸟和目标信号进行了计算和分析,通过计算可以发现,不管是飞鸟还是目标,探测器都能在较大范围内对其进行探测,因此从能量的角度是不能识别目标和飞鸟的。而从飞鸟或目标的成像面积来看,很容易得到在其探测范围内,二者都可能表现为小目标,此时从形状特征上也无法区别飞鸟和目标,由于红外小目标的探测是红外探测系统的重要内容<sup>[8-9]</sup>,那么飞鸟的存在将可能给系统造成虚警。通过前两节的讨论可以得到,对系统设计而言,可以通过增大系统的对焦距离,使得飞鸟可以被探测到的范围尽可能地缩小,同时可以使得目标信号得到增强。但同时结合图 9 可以看到,当系统焦距增大时,飞鸟的探测距离减小的速度变慢,从聚焦距离  $500\sim 2000m$  的范围内,探测距离减小的幅度很小,因此通过调整系统焦距并不能很有效地剔除飞鸟的虚警。

### 3 降低虚警的一种途径——速度

比较容易注意到的是,对于目标而言,其距离探测器较远,在探测器上的投影速度比较缓慢,且探测

系统一般是针对来袭方向的目标,那么目标在探测器上的速度范围将进一步减小;相比而言,飞鸟距离探测器比较近,其在探测器的投影速度将比较快。因此,通过速度的判断将可能区别目标和飞鸟。

由于飞鸟飞行的方向不同,其在探测器上的投影速度差别将会很大。假设  $\phi$  为飞鸟飞行方向与探测器视线方向的夹角,  $\phi \in [0, \pi]$ , 如图 13 所示, 则飞鸟在探测器上的投影速度为:

$$v_{\text{bird}}' = v_{\text{bird}} \cdot \sin\phi \cdot \frac{f}{l_{\text{bird}}} \quad (21)$$

当飞鸟沿探测器视场方向飞行时,其在探测器上的投影速度为 0,当垂直于视场飞行时,投影速度最大。例如:假设飞鸟的飞行速度为 10 m/s,距离探测器 100 m,则可以得到此时的最大投影速度为  $v_{\text{bird}}' = 0.022$  m/s,对应到像素为 733 像素/s,即该方向上飞鸟在探测器上的投影速度在 0~733 像素/s 之间。

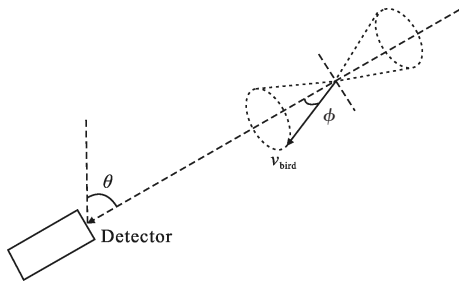


图 13 飞鸟速度示意图

Fig.13 Sketch map of bird's velocity

用  $\Delta v_{\text{target}}$  表示可能目标在探测器上的最大移动速度,同时假设飞鸟朝各个方向飞行的概率相等。当飞鸟的速度在  $0 \sim \Delta v_{\text{target}}$  之间时,在速度上飞鸟就可能成为目标的虚警源,显然这是一个概率问题,结合图 13 可得,飞鸟可能成为虚警源的概率为:

$$P_{\text{F-bird}} = P\{0 \leq v_{\text{bird}}' \leq \Delta v_{\text{target}}\} = 2P\left\{0 \leq \phi \leq \arcsin\left(\frac{\Delta v_{\text{target}}}{v_{\text{bird}}} \cdot \frac{l_{\text{bird}}}{f}\right)\right\} \quad (22)$$

因为前面假设飞鸟朝各个方向飞行的概率相等,则  $\phi$  在  $[0, \pi]$  内服从均匀分布,记为  $\phi \sim U(0, \pi)$ 。因此:

$$P_{\text{F-bird}} = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{\Delta v_{\text{target}}}{v_{\text{bird}}} \cdot \frac{l_{\text{bird}}}{f}\right) \quad (23)$$

同样假设  $\theta$  为可能目标飞行方向与探测器视线方向的最大夹角,那么可以将  $P_{\text{F-bird}}$  表示为:

$$P_{\text{F-bird}} = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{v_{\text{target}}}{v_{\text{bird}}} \cdot \frac{l_{\text{bird}}}{l_{\text{target}}} \sin\theta\right) \quad (24)$$

可以看到,在速度上存在一定的概率可以分别飞鸟和目标,这个概率由目标和飞鸟速度、目标和飞鸟距探测器的距离、目标飞行方向与探测器视线方向的夹角等有关。红外警戒探测的实际应用使得只有那些飞行方向小于允许的最大夹角  $\theta$  的目标被认为是潜在威胁目标。根据公式(24)给出的飞鸟在速度上可能成为虚警源的概率表达式可得:当认为目标是严格迎头飞过来的时候,即  $\theta=0$ ,那么此时飞鸟在速度上引起虚警的概率为 0;当然,从实际情况考虑,为了降低漏警, $\theta$  不可能为 0,若将垂直探测器视线方向运动的目标也当作潜在目标时,  $P_{\text{F-bird}}$  将取到最大值,此时的虚警概率为  $\frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{v_{\text{target}}}{v_{\text{bird}}} \cdot \frac{l_{\text{bird}}}{l_{\text{target}}}\right)$ 。

假定目标速度为 0.9 Ma (306 m/s),飞鸟的飞行速度为 10 m/s,将其最远可探测距离设为 200 m,可以计算得到不同目标探测距离时的虚警率变化曲线如图 14 所示,图中分别计算了目标探测距离为 5 km、10 km 和 15 km 时飞鸟引起的虚警概率随角度  $\theta$  的变化曲线。

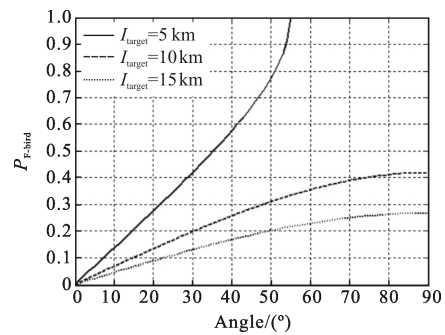


图 14 不同目标探测距离时的虚警概率  $P_{\text{F-bird}}$

Fig.14  $P_{\text{F-bird}}$  in different target detecting ragnes

从图中可以看到,飞鸟引起的虚警随着  $\theta$  的增大而增大。以目标探测距离为 10 km 为例,飞鸟引起的最大虚警概率为 41.93%,可见通过速度的差别,能在很大程度上对飞鸟进行剔除,降低飞鸟引起的虚警。但是对于目标的探测而言,此时速度引起的虚警概率是较大的,且是当目标的距离靠近时,虚警概率将更大,如当目标距离为 5 km 时,最大虚警概率达 100%。因此,为了从速度上有效降低飞鸟引起的虚警,可以根据公式(24)对各个参数进行合理的估计和设置,使得  $P_{\text{F-bird}}$  尽可能小。例如,当假设只有满

足  $\theta \leq 30^\circ$  的目标才当作来袭目标时,则在同样的参数条件下可以计算得到,此时的虚警概率将只有 19.8% ( $l_{\text{target}}=10 \text{ km}$ )。

同时还可以看到,  $P_{\text{F-bird}}$  随着目标探测距离的增加而减小,当目标探测距离在 15 km 以上时,  $P_{\text{F-bird}}$  的值将减小到 30% 以内,可见提高探测系统的性能,增加目标的告警距离,可以减少飞鸟引起的虚警问题。

## 4 结 论

对于空中目标的探测而言,尤其是大视场甚至是全视场探测的情况下,飞鸟是一种常见的背景,且与其他背景不同,飞鸟具有其独特的红外特征和运动特征,使得不能将飞鸟和其他背景作同样的处理,否则很容易引起虚警。文章详细地分析了飞鸟在探测器上的信号特征,通过对比目标可以看到,飞鸟和目标在信号的强度和形状特征方面都很相近,因此从信号上是很难分辨飞鸟和目标的,这说明对于信号处理而言,至少通过单帧的红外图像处理很难将飞鸟的信号剔除。根据实际情况,文中提出了通过飞鸟和目标在探测器上的投影速度不同来分辨二者的方法,对飞鸟在速度上可能成为虚警源的概率进行了研究,通过估算可以发现,在合理参数约束条件下,通过速度的不同,能够在很大程度上对飞鸟和目标进行区分,对于红外图像信号处理而言,可以通过多帧图像获取速度信息,从而将飞鸟剔除,降低飞鸟引起虚警。

## 参考文献:

- [1] Zhang Le, Liang Dongming, Yao Mei, et al. Equivalent calculation of operating range ofIRST [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 26-30. (in Chinese)  
张乐, 梁冬明, 姚梅, 等. 红外搜索跟踪系统作用距离等效折算[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 26-30.
- [2] Zhang Huarui, Yang Hongwen, Yu Wenxian. The Handoff method ofIRST and radar under multi-target scenario [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(5): 1101-1106. (in Chinese)  
张华睿, 杨宏文, 郁文贤. 多目标情况下IRST和雷达的指示交接问题[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(5): 1101-1106.
- [3] De Jong Arie N, Hans Winkel, Rob A W. Encountering bird alarms in full-stareIRST's [C]//Proceedings of SPIE, 2000, 4130: 700-709.
- [4] Li Peng, Chen Qian. An efficient detection algorithm for decreasing false alarm rate of infrared surveillance system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(4): 15-19. (in Chinese)  
李鹏, 陈钱. 一种有效降低红外预警系统虚警率的检测算法[J]. 光电工程, 2010, 37(4): 15-19.
- [5] Wang Weihua, Li Zhijun, He Yan, et al. A real-time target detection algorithm for infrared search and track system based on region of interest extraction[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(11): 1109001-1-1109001-6. (in Chinese)  
王卫华, 李志军, 何艳, 等. 一种基于兴趣区提取的红外搜索系统目标实时检测算法 [J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1109001-1-1109001-6.
- [6] Liao Yanbiao. Introduction to Optical Imaging [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008, 11: 46-50. (in Chinese)  
廖延彪. 成像光学导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008, 11: 46-50.
- [7] Fang Yiqiang, Fan Xiang, Cheng Zhengdong, et al. Research on the operating range of ground-based IR alarm system in clear sky [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1654-1659. (in Chinese)  
方义强, 樊祥, 程正东, 等. 晴空背景下地基红外告警系统作用距离研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1654-1659.
- [8] Wan Ming, Zhang Fengming, Hu Shuang. Novel infrared dim and small target detection algorithm based on multi-scale gradient[J]. *Acta Optic Sinica*, 2011, 31(10): 1011001-1-1011001-6. (in Chinese)  
万明, 张凤鸣, 胡双. 于多步长梯度特征的红外弱小目标检测算法[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1011001-1-1011001-6.
- [9] Liu Yunlong, Xue Yuli, Yuan Suzhen, et al. Nfrared small targets detection using local mean [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 814-822. (in Chinese)  
刘运龙, 薛雨丽, 袁素真, 等. 基于局部均值的红外小目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 814-822.