

一种检测红外点目标的方法

曹建清 吴常泳 周世椿

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要 提出了一种用二次阈值检测红外点目标的方法, 该方法对于提高红外警戒系统的探测率和控制虚警率具有较好的效果。

关键词 红外警戒系统, 信号处理, 目标检测, 自适应阈值。

引言

红外警戒系统用于探测来袭的飞机和导弹, 由于具有被动工作的优点, 在现代高科技电子战中起着越来越大的作用. 在系统设计时, 除了要求高质量的光机系统、高性能的探测器组件外, 信号处理与检测也是非常关键的部分. 红外警戒系统作全方位, 大俯仰范围扫描时, 所要探测的是远距离的小目标, 其信号处理与检测一般包括空间滤波, 阈值比较, 潜在目标判别等几部分, 每一部分都有自身的特点, 因而有别于红外成像系统.

红外警戒系统的搜索范围大, 背景成分复杂, 空间滤波器首先滤去背景中大量的低频成分, 然后取适当的阈值, 得到少量的过阈值点, 由计算机作进一步的处理, 从而识别出目标. 其中阈值的选取是关键的一步, 为此我们提出一种取二次阈值检测目标信号的方法.

1 目标、背景和噪声模型

红外警戒系统被动地接收红外辐射信号. 目标的辐射强度是未知的, 且随时间不断变化, 但在某一瞬间, 系统接收到的目标信号却可以认为是稳定的, 是一非随机变量. 红外背景更是复杂多变, 但在某个瞬间, 背景的辐射值却同样是稳定的, 也是非随机变量.

任何的信号检测系统都不可避免地存在着噪声, 红外警戒系统中输入至空间滤波器的信号包括目标信号, 背景信号和噪声三部分. 输入信号可以表示为:

$$\begin{cases} X_i = S + n, & \text{有目标时,} \\ X_i = B + n, & \text{无目标时;} \end{cases} \quad (1)$$

(2)

式中, X_i 为滤波器的输入信号, S 为瞬时视场中有目标时的信号, B 为背景信号, n 为噪声.

实验证明, 随机噪声 n 按正态分布, 其概率密度函数为:

$$P(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp \frac{-(n-\bar{n})^2}{2\sigma_n^2}. \quad (3)$$

根据概率统计理论, X_i 的分布也为正态分布, 在系统设计中, 信号放大部分通常设计成低通滤波器, 而空间滤波器具有高通的性质, 故最后的效果是: X_i 经过空间滤波器后, 可以认为近似于瑞利分布, 其概率密度函数为:

$$P(X_i) = \frac{X_i - S_i - m}{2\pi\sigma^2} \exp \frac{-(X_i - S_i - m)^2}{2\sigma^2}, \text{ (有目标时)} \quad (4)$$

$$P(X_i) = \frac{X_i - B_i - m}{2\pi\sigma^2} \exp \frac{-(X_i - B_i - m)^2}{2\sigma^2}, \text{ (无目标时)} \quad (5)$$

式中, S_i 、 B_i 分别为滤波后目标和背景的值, m 为噪声的平均值, σ^2 为噪声的方差.

2 目标信号的检测

目标信号的检测主要通过取阈值实现, 图 1 为阈值选取示意图.

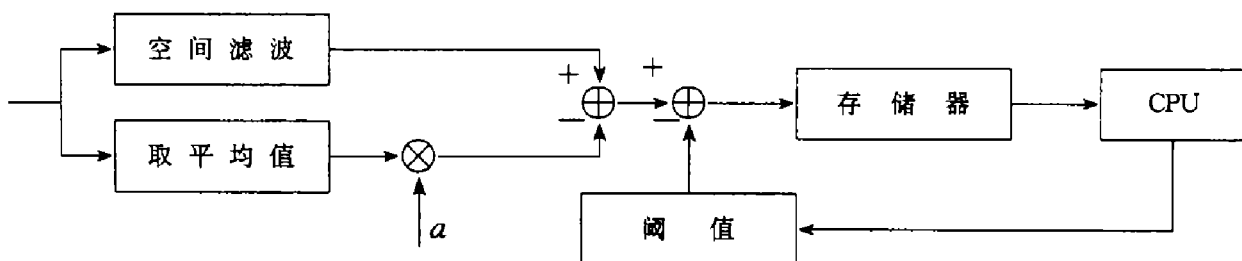


图 1 二次阈值选取示意图
Fig. 1 Two-threshold method

图 1 中第一个阈值为实时自适应阈值, 通过取邻域的平均值乘以常数 a 得到, 它随背景强度的变化而变化, 这样的设计是基于红外背景的起伏很大, 经常会出现大片的高亮度云层和面积的地物背景, 在它们的内部会有许多类似点目标的信号和边缘突变信号, 如果取的阈值固定不变, 会产生大量的过阈值点而可能使计算机饱和. 第二个阈值由计算机控制, 在计算机速度允许的范围内, 尽可能多地取过阈值点, 以保证较高的探测率.

空间滤波经第一次阈值比较后的信号可表示为:

$$X_2 = S_2 + n_2, \text{ (有目标)} \quad (6)$$

$$X_2 = B_2 + n_2, \text{ (无目标)} \quad (7)$$

取第二次阈值后, 过阈值点有两种可能, 或是背景信号, 或是目标信号; 从信号检测理论角度考虑, 这是一个二元信号检测问题. 假设 H_0 和 H_1 分别表示有目标信号存在和无目标信号

存在,即:

$$H_0: X_2 = S_2 + n_2, \quad (8)$$

$$H_1: X_2 = B_2 + n_2, \quad (9)$$

它们的似然函数分别为:

$$P(X_2 | H_0, S_2) = \frac{X_2 - S_2 - m}{\sigma^2} \exp \left[-\frac{(X_2 - S_2 - m)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (10)$$

$$P(X_2 | H_1, B_2) = \frac{X_2 - B_2 - m}{\sigma^2} \exp \left[-\frac{(X_2 - B_2 - m)^2}{2\sigma^2} \right]; \quad (11)$$

似然比为:

$$\begin{aligned} l(X_2) &= \frac{P(X_2 | H_0, S_2)}{P(X_2 | H_1, B_2)} \\ &= \frac{X_2 - S_2 - m}{X_2 - B_2 - m} \exp \left[\frac{(S_2 - B_2)(2X_2 - B_2 - S_2 - 2m)}{2\sigma^2} \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

由于目标的出现对红外警戒系统来说完全是随机的,其先验概率是未知的,根据奈曼——皮尔逊准则,其判别规则为:

$$l(X_2) \underset{H_1}{\overset{H_0}{>}} l_0 \quad (13)$$

对式(12)两边取自然对数,得

$$\ln \left(\frac{X_2 - S_2 - m}{X_2 - B_2 - m} \right) + \frac{(S_2 - B_2)(2X_2 - B_2 - S_2 - 2m)}{2\sigma^2} \underset{H_1}{\overset{H_0}{>}} \ln l_0. \quad (14)$$

本系统探测的是微弱点目标信号,有

$$\begin{aligned} \ln \left(\frac{X_2 - S_2 - m}{X_2 - B_2 - m} \right) &\approx 0, \text{ 则} \\ X_2 &\underset{H_1}{\overset{H_0}{>}} \frac{\sigma^2 \ln l_0}{S_2 - B_2} + B_2 + S_2 + 2m = t_0. \end{aligned} \quad (15)$$

t_0 要选择的阈值,如果 $X_2 > t_0$, 可以认为是潜在目标,当然实际上常常是背景信号,即虚警(见图 2),其虚警率为:

$$P_f = \int_{t_0}^{\infty} P(X_2 | H_1, B_2) = \exp \left[-\frac{(t_0 - B_2 - m)^2}{2\sigma^2} \right]. \quad (16)$$

为了保证较高的探测率,要使过阈值点尽可能地多,过阈值点的上限要根据计算机的速

度而定,计算机要随时调整阈值 t_0 .

假设在某一时刻虚警率刚好满足要求,但过一段时间后,发现过阈值点太多,随之,计算机把阈值提高. 设理想的虚警率为 P_{f1} , 此时阈值为 t_1 , 如果虚警率升高到了 P_{f2} , 则要把阈值提高到 t_2 才能使虚警率降到 P_{f1} , 根据式(16)有

$$P_{f1} = \exp\left[-\frac{(t_1 - B' - m)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (17)$$

$$P_{f1} = \exp\left[-\frac{(t_2 - B'' - m)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (18)$$

$$P_{f2} = \exp\left[-\frac{(t_1 - B'' - m)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (19)$$

B' 和 B'' 分别为两种情况下的背景值, 由式(17)、(18)和(19)得到,

$$t_2 = t_1 + \sqrt{-2\sigma^2 \ln P_{f1}} - \sqrt{-2\sigma^2 \ln P_{f2}}, \quad (20)$$

式(20)中方差 σ^2 是未知的, 但可以事先求得, 设在同一背景下, 取阈值 t' 时, 虚警率为 $P_{f'}$; 取阈值 t'' 时, 虚警率为 $P_{f''}$, 则有,

$$\sqrt{-2\sigma^2 \ln P_{f'}} = t' - B - m, \quad (21)$$

$$\sqrt{-2\sigma^2 \ln P_{f''}} = t'' - B - m, \quad (22)$$

$$\sigma = \frac{t'' - t'}{\sqrt{-2 \ln P_{f''}} - \sqrt{-2 \ln P_{f'}}}, \quad (23)$$

将 σ 代入式(20)可得新的阈值:

$$t_2 = t_1 + \frac{t'' - t'}{\sqrt{-2 \ln P_{f''}} - \sqrt{-2 \ln P_{f'}}} \left(\sqrt{-2 \ln P_{f1}} - \sqrt{-2 \ln P_{f2}} \right). \quad (24)$$

反之, 如果过阈值点偏少, 就要降低阈值. 把过阈值点的值及其方位、俯仰信息存储起来, 供计算机进一步识别用. 常用的方法有光谱相关和扫描相关等, 把大量的过阈值点排除掉, 只提取真正的目标信号.

3 结论

上述的分析给出了一种检测红外点目标的方法, 通过利用过阈值点的多少改变阈值的大小, 使虚警率保持在一定的范围内. 该方法用硬件实现已取得了初步的实验结果, 表明本方法对于提高探测率和控制虚警率有较好的效果.

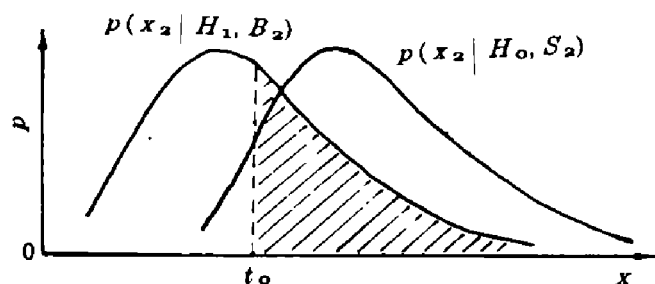


图2 阈值 t_0 的选取

Fig. 2 Selection of the threshold t_0

参考文献

- 1 Richard D H Jr. *Infrared System Engineering*, New York: John Wiley & Sons, Inc, 1969, 304
- 2 Lawrence N P, et al. *SPIE*, 1987, 750: 92

A METHOD FOR DETECTING IR POINT TARGETS

Cao Jianqing Wu Changyong Zhou Shichun

(*Shanghai Institute of Technical Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract A method with two thresholds for detecting IR point targets is presented. This method is effective for improving the probability of detection and controlling the false alarm rate of IR warning systems.

Key words IR warning system, Signal processing, target detection, adaptive threshold.