

## 管道检测对IRST系统探测与虚警概率的影响

马东辉<sup>1</sup>, 孙中涛<sup>2</sup>, 朱斌<sup>1</sup>, 冯一<sup>1,3</sup>

(1. 电子工程学院, 安徽合肥 230037; 2. 安徽省人民防空办公室, 安徽合肥 230000;  
3. 中国科技大学软件学院, 安徽合肥 230027)

**摘要:** 探测概率、虚警概率是衡量红外搜索跟踪系统性能的重要指标, 其大小由系统硬件水平、检测算法设计等因素决定。通过分析影响红外搜索跟踪系统探测概率、虚警概率的因素, 建立了管道检测与探测概率、虚警概率关系模型, 研究了序列图像检测中管道检测对系统探测概率、虚警概率的影响。通过仿真分析了实验结果, 系统总检测概率与总虚警率分别随单帧检测概率与单帧虚警率的增加而增加, 在管道长度相同的情况下, 总检测概率和总虚警率都将随需检测帧数的增大而减小。

**关键词:** 红外搜索跟踪系统; 管道检测; 探测概率; 虚警概率

中图分类号: TN215 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)01-0012-05

## Influence of pipeline detection on detection and false alarm probability ofIRST system

Ma Donghui<sup>1</sup>, Sun Zhongtao<sup>2</sup>, Zhu Bin<sup>1</sup>, Feng Yi<sup>1,3</sup>

(1. Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China; 2. Civil Air Defence Office of Anhui Province, Hefei 230000, China;  
3. School of Software, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** Detection probability and false alarm probability are two of the most important performance index of an infrared search and track (IRST) system. Detection probability and false alarm probability were decided by the performance of system hardware and detection algorithm, etc. The influence factors to system detection probability and false alarm probability were analyzed in this paper; the model of relationship between pipeline detection, detection probability and false alarm probability was established; the influence of pipeline detection to system detection probability and false alarm probability were studied. The simulation was conducted and the experiment results were analyzed. The system total detection probability or total false alarm probability will increase when the single frame detection probability or single frame false alarm probability increase, respectively. If the pipeline length is fixed, system total detection probability and total false alarm probability will decrease when the number of required detection frames increase.

**Key words:** IRST system; pipeline detection; detection probability; false alarm probability

收稿日期: 2014-05-05; 修订日期: 2014-06-15

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

作者简介: 马东辉(1973-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事光电对抗方面的研究。Email: 524242922@qq.com

## 0 引言

红外搜索跟踪(Infrared Search and Track, IRST)系统为被动工作方式,接收目标自身红外辐射和散射其他辐射源的红外辐射,隐蔽性好、探测距离较远、跟踪测向精度高,不易受战场复杂电磁环境的影响,在现代战争中发挥着极其重要的作用,是各军事强国的重点发展方向<sup>[1-2]</sup>。

探测概率与虚警概率是IRST系统两个重要指标。当搜索视场中出现目标时,系统能够将它探测出来的概率称为探测概率;当搜索视场内没有目标时,系统却误认为有目标的概率称为虚警概率。在红外搜索跟踪系统中,两者相互影响、相互制约<sup>[3]</sup>,共同衡量着IRST系统的探测性能。如何在提高探测概率的同时有效降低虚警概率成为研究人员一直关注的焦点之一。传统的方法一般可以分为以下两类:一类是通过提高成像质量、降低最小可检测信噪比;另一类是通过改进系统的检测算法。参考文献[3]讨论了探测概率、虚警概率与信噪比的关系;参考文献[4]分析了图像处理算法对系统探测概率、虚警概率及作用距离的影响;参考文献[5]通过对系统MRTD(最小可分辨温差)在实用条件下的修正,提出了实际计算系统探测概率、虚警概率的方法,可以达到提高探测概率、降低虚警概率的目的。

管道检测是某些使用单帧算法的IRST系统在单帧检测完毕后的一种多帧判别方法<sup>[6-7]</sup>。用来对探测空域有无目标做出最终判断,起到降低虚警概率的作用。文中针对管道检测,讨论了其对系统探测概率、虚警概率的影响,结合管道检测推导了序列图像检测的探测概率和虚警概率。

## 1 管道检测

IRST系统的检测算法可分为先检测后跟踪(Detection Before Track, DBT)和先跟踪后检测(Track Before Detection, TBD)两大类<sup>[8]</sup>。TBD算法把运动弱小目标检测问题看作是目标轨迹搜索及能量累积后作出判决的过程。而DBT算法首先在一帧图像中确定可疑目标,即单帧处理;然后,利用图像序列来确认潜在目标,即多帧确认。DBT算法与TBD算法相比结构简单、运算量较小,是IRST系统常用的检测

算法类型。

管道检测就是在连续 $n$ 帧图像中,一定空间范围内只要有目标出现的次数达到或超过 $m$ 次( $1 \leq m \leq n$ ),就认为出现目标,称 $n$ 为管道长度, $m$ 为需检测帧数;而该空间范围内出现目标的次数 $< m$ 次时,则认为没有目标。

显然,通过管道检测的方式可以利用目标运动的帧间相关性,有效剔除随机噪声对检测的影响,降低虚警概率。

## 2 探测概率分析模型

对于使用管道检测的红外告警跟踪系统,探测概率有单帧探测概率和总探测概率之分。

单帧探测概率是对单帧图像进行检测,检测到目标的次数与目标实际存在次数的比值。设单帧中检测到目标的概率为 $P_d$ ,这一事件称为事件 $A$ 。对含有目标的动态图像连续进行 $n$ 次独立的检测(即 $n$ 帧), $k$ 表示 $n$ 次检测中检测到目标的次数,则 $k$ 的取值可能是 $0, 1, 2, \dots, n$ 。

由概率论的知识<sup>[9]</sup>,检测只可能有两种结果: $A$ (检测到目标)和 $\bar{A}$ (没有检测到目标)。 $P(A)=P_d, P(\bar{A})=1-P_d$ 。由于各次检测为相互独立的,因此事件 $A$ 在指定的 $m$ ( $0 \leq m \leq n$ )次检测中发生,其他 $n-m$ 次检测中不发生的概率为:

$$\overbrace{P_d \cdot P_d \cdots P_d}^m \cdot \overbrace{(1-P_d) \cdot (1-P_d) \cdots (1-P_d)}^{n-m} = P_d^m (1-P_d)^{n-m}$$

由于这种指定的方式共有 $C_n^m$ 种,它们是两两不相容的,故在 $n$ 次检测中 $A$ 发生 $m$ 次的概率为 $C_n^m P_d^m (1-P_d)^{n-m}$ ,即

$$P\{k=m\} = C_n^m P_d^m (1-P_d)^{n-m}, m=0, 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其二项分布函数为:

$$F(k) = P(k \leq m) = \begin{cases} 0 & m \leq 0 \\ \sum_{k=0}^m C_n^k P_d^k (1-P_d)^{n-k} & 1 \leq m \leq n \\ 1 & m \geq n \end{cases} \quad (2)$$

总探测概率 $P_D$ 定义为:在 $n$ 帧检测中,至少有帧检测到目标(即 $k \geq m$ )的概率。

$$P_D = 1 - P(k < m) = 1 - \sum_{k=0}^{m-1} C_n^k P_d^k (1-P_d)^{n-k} = \sum_{k=m}^n C_n^k P_d^k (1-P_d)^{n-k} \quad (3)$$

从公式(1)和(3)可看出,单帧探测概率和总探测

概率相互影响,图 1 针对不同的  $n, m$  分别计算并得到了两者的关系。

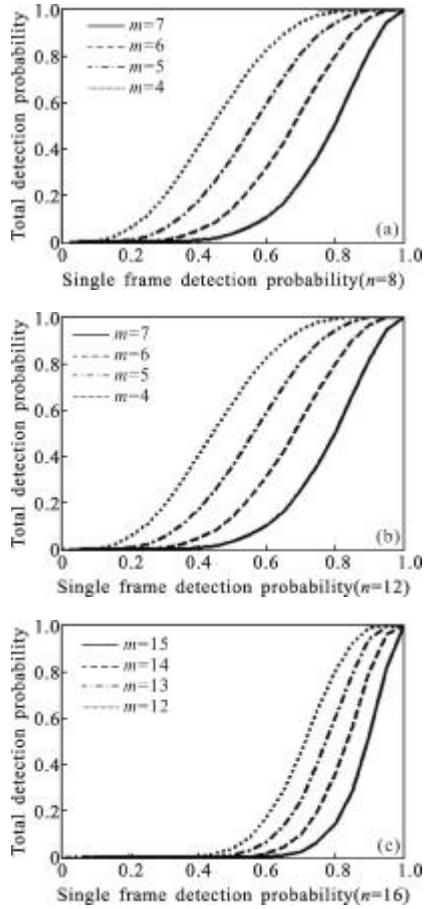


图 1 不同  $n, m$  值对应的总探测概率与单帧探测概率的关系

Fig.1 Different values of  $n$  and  $m$  corresponding total and single frame detection probability

由图可以看出,总探测概率随着单帧探测概率的增大而增大;在总检测帧数相同的情况下,总探测概率会随着  $m$  值的增大而减小,这是因为在一轮检测过程中,要求检测出目标的最少帧数越大意味着检测成功标准越严格。因此,如果单从总探测概率来考虑, $m$  值越小越好。

### 3 虚警概率分析模型

单帧虚警概率  $P_f$  是指在一定的检测次数中检测到目标而目标实际不存在的次数与检测次数的比值。当背景中某些位置的灰度值由于噪声的影响高于检测门限时,检测后将判定为目标点,这时便出现了虚警。发生一次虚警的平均时间间隔称为虚警时间,单位时间内的平均虚警次数称为虚警率。

总虚警概率  $P_F$  定义为:在  $n$  帧检测中,至少有  $m$  帧出现虚警的概率。可见总虚警概率的推导跟总探测概率的推导完全相同,由公式(3)可知,总虚警概率为:

$$P_F = \sum_{k=m}^n C_n^k P_f^k (1-P_f)^{n-k} \quad (4)$$

在实际系统设计中,人们往往关心的不是虚警概率,而是某段时间内出现虚警的次数或出现 1 次虚警的平均时间。平均虚警时间  $T_f$  是指:在这个时间内,告警系统只给出不大于 1 次的虚警。已知检测  $n$  帧图像引起虚警的概率为  $P_F$ , 设  $v$  为 CCD 的帧频,那么在  $T$  时间内总共可检测  $Tv$  帧,出现虚警的次数为  $N=(Tv/n)P_F$ 。于是  $T$  时间内发生虚警的平均时间间隔为:

$$T_f = \frac{T}{N} = \frac{n}{vP_F} \quad (5)$$

通过公式(4),分别计算在不同  $n, m$  单帧虚警概率和总虚警概率的关系,如图 2 所示。

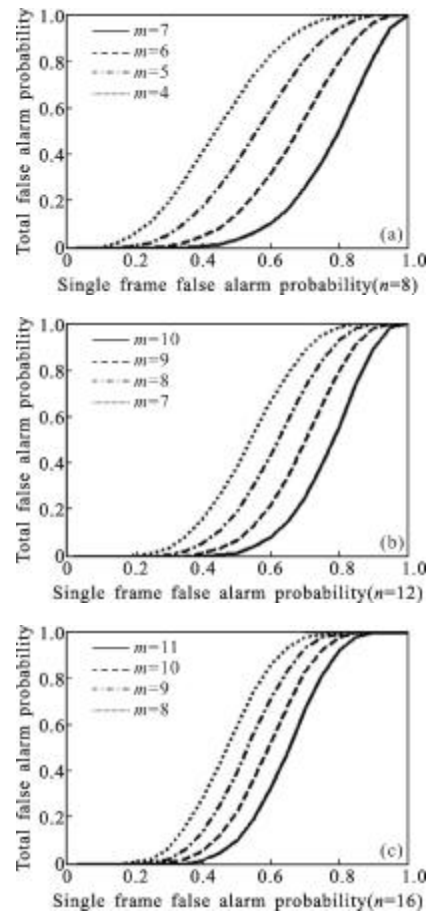


图 2 不同  $n, m$  值对应的总虚警概率与单帧虚警概率的关系

Fig.2 Different values of  $n$  and  $m$  corresponding total and single frame false alarm probability

由图可以看出,高的单帧虚警概率将导致高的总虚警概率;在总检测帧数相同的情况下,总虚警概率会随着  $m$  值的增大而减小,这是因为在一轮检测过程中,要求出现虚警的最少次数越大意味着将某点判断为虚警的标准越苛刻。由此可见,在实际应用中  $m$  值必须由总探测概率与总虚警概率综合决定。

### 4 仿真结果与分析

在满足实际应用的条件下,为了进一步研究不同的参数对系统探测概率、虚警概率的影响,根据公式(1)、(3)、(4)建立的管道检测与探测概率、虚警概率关系模型,设单帧探测概率为  $P_d=0.9$ ,若要求总探测概率  $P_D \geq 0.98$ ,由公式(3)可知,当  $n=16$  时, $m=12$ ;当  $n=12$  时, $m=8$ ;当  $n=8$  时, $m=5$ ;满足条件。各种情况对应的总探测概率如表 1 所示。

表 1  $P_d=0.9$  时不同  $m$  值对应的总探测概率

Tab.1 Different values of  $m$  corresponding total detection probability when  $P_d=0.9$

Pipeline length		Number of required detection frame and total detection probability			
n=8	m	7	6	5	4
	$P_D$	0.813	0.961 9	0.995	0.999 6
n=12	m	11	10	9	8
	$P_D$	0.659	0.889 1	0.974	0.995 7
n=16	m	15	14	13	12
	$P_D$	0.514 7	0.789 2	0.932	0.983

虽然上述 4 种情况选择合适的  $m$  值,均能在  $P_d=0.9$  时,使总探测概率达到或超过 0.98,但它们的虚警概率是不一样的。

若  $P_d \geq 0.9$ ,单帧虚警概率  $P_f \leq 0.05$ ,要求系统的总虚警概率  $P_F \leq 10^{-6}$ ,则当  $n=8, 12, 16$  时,各种情况对应的总虚警概率如表 2 所示。

由表 2 可以看出,在单帧虚警概率相同的条件下,改变总检测帧数  $n$  和要求出现虚警的最小次数  $m$  将导致总虚警概率的极大变化, $m$  值越大总虚警概率越小。而增大  $m$  值会导致总探测概率的减小。在上述前提下,符合要求的管道参数取值为  $n=16$  时, $m \geq 8$ ;当  $n=12$  时, $m \geq 7$ ;当  $n=8$  时, $m \geq 6$  时均达不到  $P_F \leq 10^{-6}$  的要求。

表 2  $P_f=0.05$  时不同  $m$  值对应的总虚警概率

Tab.2 Different values of  $m$  corresponding total false alarm probability when  $P_f=0.05$

Pipeline length		Number of required detection frame and total false alarm probability			
n=8	m	7	6	5	4
	$P_F$	$5.976 6 \times 10^{-9}$	$4.008 2 \times 10^{-7}$	$1.540 5 \times 10^{-5}$	$3.717 5 \times 10^{-4}$
n=12	m	11	10	9	8
	$P_F$	$5.590 8 \times 10^{-14}$	$5.872 8 \times 10^{-12}$	$3.742 8 \times 10^{-10}$	$1.612 4 \times 10^{-8}$
n=16	m	7	6	5	4
	$P_F$	$4.949 \times 10^{-7}$	$1.110 8 \times 10^{-5}$	$1.839 5 \times 10^{-4}$	$2.236 4 \times 10^{-3}$
n=16	m	15	14	13	12
	$P_F$	$4.653 9 \times 10^{-19}$	$6.656 6 \times 10^{-17}$	$5.927 5 \times 10^{-15}$	$3.678 4 \times 10^{-13}$
n=16	m	11	10	9	8
	$P_F$	$1.687 1 \times 10^{-11}$	$5.917 4 \times 10^{-10}$	$1.619 5 \times 10^{-8}$	$3.497 2 \times 10^{-7}$
n=16	m	7	6	5	4
	$P_F$	$5.982 6 \times 10^{-6}$	$8.09 \times 10^{-5}$	$8.573 1 \times 10^{-4}$	$7.003 9 \times 10^{-3}$

根据公式(5),计算得到平均虚警时间与总虚警概率的关系,如图 3 所示。

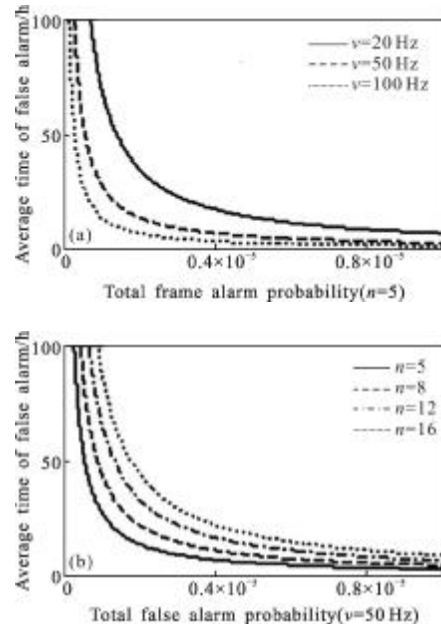


图 3 平均虚警时间与总虚警概率的关系

Fig.3 Relationship between average time of false alarm and total false alarm probability

由图 3 可以看出, 平均虚警时间  $T_f$  随着总虚警概率  $P_f$  的增大而降低。当  $n$  一定时, 同一虚警概率, 帧频越小平均虚警时间越大。当帧频一定时, 同一虚警概率,  $n$  越大平均虚警时间越大。从理论上讲, 减小虚警概率、降低帧频或增大  $n$  值都能延长平均虚警时间。但在实际应用中, 固定的 CCD 成像器件帧频为定值, 过大的  $n$  值将使系统的实时性有所降低, 且对于某些特定的应用来说管道长度有一个取值范围, 因此  $n$  只能在允许的范围内取较大的值。

## 5 结束语

通过分析影响系统探测概率、虚警概率的因素, 从序列图像检测中管道检测对系统探测概率、虚警概率的影响出发, 建立了管道检测与探测概率、虚警概率的关系模型, 并进行了仿真实验得出了实验结果。结果表明: 首先, 总检测概率随单帧检测概率的增大而增大, 总虚警概率也随单帧虚警概率的增大而增大; 总虚警概率越小平均虚警时间越长; 其次, 在管道长度(总检测帧数) $n$  相同的情况下, 总检测概率和总虚警率都将随需检测帧数  $m$  的增大而减小。最后, 在管道长度固定时, 同一总虚警概率, 帧频越小平均虚警时间越长; 而帧频固定时, 同一总虚警概率, 帧数越大平均虚警时间越长。上述结论对设计管道检测型 IRST 系统将有所帮助。

### 参考文献:

- [1] William E. Moore. Infrared search and track system developmt [C]//IEEE 6th Digital Avionics Systems Conference, 1984,12: 3-6.
- [2] Everett M, Manson D, Brook A, et al. A naval infrared search and track demonstrator and its fusion with other ship sensors[C]//SPIE, 2006, 6206: 620626.
- [3] Qi Meng. Detection Probability of IR search and track system [J]. Laser & Infrared, 2004, 34(4): 269-300. (in Chinese)  
祁蒙. 红外搜索跟踪系统的探测概率研究 [J]. 激光与红外, 2004, 34(4): 269-300.
- [4] Chang Honghua, Zhang Jianqi, Wang Xiaorui, et al. Background clutter and detection algorithm-based Staring IR seeker performance evaluation[C]//SPIE, 2005, 5640: 381-390.
- [5] Zhou Gang. The target discovery and identification probability of infrared imaging system [J]. Infrared Technology, 2001, 23(3): 16-18. (in Chinese)  
周刚. 红外成像系统对目标的发现和识别概率[J]. 红外技术, 2001, 23(3): 16-18.
- [6] Liu Gang, Liang Xiaogeng. Detection of aerial small target in infrared image based on wavelet transform and pipeline filter [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(30): 198-201. (in Chinese)  
刘刚, 梁晓庚. 基于小波变换和管道滤波的红外空中小目标检测[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(30): 198-201.
- [7] Lian Ke, Wang Houjun, Li Dan. Pipeline filtering method based on feature analysis of local grey level of small infrared target [J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2011, 31(4): 200-203. (in Chinese)  
连可, 王厚军, 李丹. 基于红外目标局部灰度特性分析的管道滤波方法[J]. 弹舰与制导学报, 2011, 31(4): 200-203.
- [8] Warren R C. The real time calculation of cloud motion in infrared image sequences using mathematics morphology operations[C]//IEEE Proceeding of Information Decision and Control, 1999: 83-89.
- [9] Sheng Zhou, Xie Shiqian, Pan Chengyi. Probability Theory and Mathematical Statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. (in Chinese)  
盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.