

## 基于时空搜索的红外微弱点状动目标检测技术

艾斯卡尔<sup>1</sup>, 陈颖<sup>2</sup>

(1.新疆大学 数学学科博士后科研流动站,新疆 乌鲁木齐 830046;

2.中国电子科技集团 第十研究所,四川 成都 610036)

**摘要:**在背景杂波被抑制后的图像序列中,残留样本为相互独立、服从高斯分布的条件下,首先论述了理想三维时空搜索检测算法,并对其性能进行分析。结果表明,虽然它具有最佳的检测性能,但是由于需要事先知道关于噪声及目标先验知识的缘故,无法进行实际应用。对此,研究了直接利用观测样本来估计噪声及目标的一、二阶矩,从而无须事先知道噪声统计特性的三维时空搜索检测算法及其详细步骤,推导了二元判决统计量所服从的概率分布函数(结果为 $t$ 分布),对比分析了算法的检测性能,并给出了理想算法和本算法中共存的问题及其相应的改进方案。此种算法在连续多帧做任意运动的流星、人造卫星以及其他运动目标的光学检测与跟踪中应用广泛。

**关键词:**检测与估计; 时空搜索; 点状目标; 弱信号; 红外图像序列

**中图分类号:**TN911.71 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)04-0490-05

## Spatial-temporal detection of dim point moving targets in IR images

Askar<sup>1</sup>, CHEN Ying<sup>2</sup>

(1.Postdoctoral Research Workstation of Mathematics, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2.No.10th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** After the discussion of detection performance and critical constraints of ideal spatial-temporal algorithm for detecting dim point moving targets in background-clutter suppressed IR images under the assumption of independent identical distribution of residual samples containing signal plus noise and noise alone, a new practically efficient spatial-temporal detection algorithm is introduced in which there is no need knowing priori information about the noise or targets, instead they are estimated from the samples directly. The probabilistic distribution of statistic for binary hypothesis testing is derived and its result is  $t$ -distribution function. The detection performance analysis, the problems remained in those two cases and their solutions are also given in this paper. The algorithm is useful for optically detecting meteors, satellites, and other moving targets which move in an arbitrary path across many frames of data.

**Key words:** Detection and estimation; Spatial-temporal detection; Dim point target; Weak signal; IR image

收稿日期:2005-01-15; 修订日期:2005-03-26

作者简介:艾斯卡尔(1972-),男,新疆乌鲁木齐人,副教授,博士,研究方向为视频图像目标检测、识别与跟踪、多媒体信息内容分层与检索。

## 0 引言

从红外图像序列中检测微弱点状运动目标,对空中或地面的远程监控系统有重要的意义。由于目标距离较远,在成像系统中表现为点状目标特性。在这种情况下,目标几乎完全淹没在背景及噪声之中,使得在单帧图像上几乎不可能检测出目标,或即使检测出目标也常常伴随着大量的假目标。因此,目前的检测技术以多帧为主<sup>[1-7]</sup>。多帧检测可直接在三维(二维空间,一维时间)图像空间中进行,参考文献[1]根据目标运动速率的假设,直接将所有可能运动轨迹上的目标能量累加,其值大于某一门限的判为目标轨迹,否则判为噪声轨迹。参考文献[2]采用多级假设检验,在当前和以前图像帧中,将可能轨迹上目标灰度值的累加值与两个门限进行比较,超过高门限的被接受为目标轨迹;低于低门限的被认为是噪声轨迹;介于两个门限之间的继续在下一帧进行同样的判断。可见,这些算法是通过积累分数在多帧中的目标能量,达到提高信噪杂波比(SCNR)的目的。根据信息论的观点,此类算法中无信息丢失,故检测精度高,这一点在低 SCNR 情况下占有非常重要的地位。本文论述了理想情况下的三维时空搜索检测算法,进行了其性能分析,并指出其在实际应用中的不足。

研究了实用的基于观测样本的三维时空搜索检测算法,推导了二元决策统计量所服从的概率分布,给出了其性能分析。

背景杂波抑制后的含有点状动目标的序列图像观测模型为:

$$Z(\mathbf{r},k)=\sum_{i=1}^{m_k} A_i \delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_i,t-k)+N(\mathbf{r},k) \quad (1)$$

式中  $\mathbf{r}=(x,y)$  为图像的二维空间坐标; $k$  为离散时间采样点; $m_k$  为在  $k$  时刻的未知总目标数; $A_i$  和  $\mathbf{r}_i$  分别为第  $i$  个未知目标的亮度值和位置; $N(\mathbf{r},k)$  为零均值高斯白噪声。

## 1 理想三维时空搜索检测算法及其性能分析

### 1.1 算法描述

对于图像序列  $Z(x,y,k)k=1, \dots, K$ , 令轨迹为  $S$ , 在

时空域上  $S$  由三维坐标  $(x_i, y_i, k)$  表示,其中  $(x_i, y_i)$  为空间图像坐标,  $k$  为时间坐标, 对应为帧号。令轨迹  $S$  上像素点的集合为  $I(S)$ , 则  $I(S)$  可表示为:

$$I(S)=\{Z_1(x,y,k), \dots, Z_K(x,y,k) | (x,y,k) \in S\} \quad (2)$$

对于任意轨迹  $S$ , 它可能是目标轨迹, 也可能是非目标轨迹, 即检测轨迹  $S$  是否为目标运行轨迹, 对应于以下二元假设问题:

$H_0$  轨迹  $S$  非目标运行轨迹;

$H_1$  轨迹  $S$  为目标运行轨迹。

在  $H_0$  假设下, 其概率密度函数为:

$$f(I(S)|H_0)=\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\right)^K \exp\left\{-\sum_{j=1}^K Z_j^2/2\sigma^2\right\} \quad (3)$$

则在  $H_1$  假设下, 其概率密度函数为:

$$f(I(S)|H_1)=\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\right)^K \exp\left\{-\sum_{j=1}^K (Z_j-\mu)^2/2\sigma^2\right\} \quad (4)$$

式中  $\mu=A$ , 为目标亮度值;  $\sigma$  为噪声标准方差。

由最大似然概率检测准则, 有:

$$\lambda[I(S)]=\frac{f(I(S)|H_1)}{f(I(S)|H_0)}=\exp\left\{-\sum_{j=1}^K \frac{(Z_j-\mu)^2-Z_j^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (5)$$

取对数, 经推导, 有判决规则为:

$$\sum_{j=1}^K Z_j \geq \beta \quad (6)$$

式中  $\beta$  为判决门限。

### 1.2 算法性能分析

考虑决策统计量  $I=\sum_{j=1}^K Z_j$ , 由于  $Z_j$  服从高斯分布, 且相互之间统计独立, 故决策统计量  $I$  亦服从正态高斯分布, 因此只需计算出在各假设条件下  $I$  的均值和方差, 便可得出  $I$  的概率密度函数。

在  $H_1$  的假设下, 有:

$$E(I|H_1)=\mu K \quad (7)$$

$$\text{Var}(I|H_1)=K\sigma^2 \quad (8)$$

在  $H_0$  的假设下,有:

$$E(\Pi H_0) = 0 \quad (9)$$

$$\text{Var}(\Pi H_0) = K\sigma^2 \quad (10)$$

故在各假设条件下,决策统计量  $I$  的概率密度函数分别为:

$$f(\Pi H_1) = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi K} \sigma} \right) \exp\left\{ -\frac{(I - \mu K)^2}{2K\sigma^2} \right\} \quad (11)$$

$$f(\Pi H_0) = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi K} \sigma} \right) \exp\left\{ -\frac{I^2}{2K\sigma^2} \right\} \quad (12)$$

在判决门限为  $\beta$  的情况下,检测概率为:

$$P_d = \int_{\beta}^{\infty} f(\Pi H_1) dI \quad (13)$$

虚警概率为:

$$P_{fa} = \int_{\beta}^{\infty} f(\Pi H_0) dI \quad (14)$$

可知,对于该理想检测算法,其增益为:

$$(S/N)_{out} = \frac{(\mu K)^2}{K\sigma^2} = K \frac{\mu^2}{\sigma^2} = K(S/N)_{in} \quad (15)$$

从公式(15)可知,对于理想检测算法,其输出信噪比是输入信噪比的  $K$  倍,参与检测的图像序列帧数越多,检测性能越好。

接收机运行性能(ROC)曲线是描述检测概率及虚警概率关系的曲线,被广泛地用于测试各类检测算法的性能。图 1(a)给出了不同 SCNR 情况下  $K=5$  时该检测算法的理论性能,图 1(b)给出了不同 SCNR 情况下  $K=10$  时该检测算法的理论性能。图中,SCNR 是公式(15)中的输入信噪比。

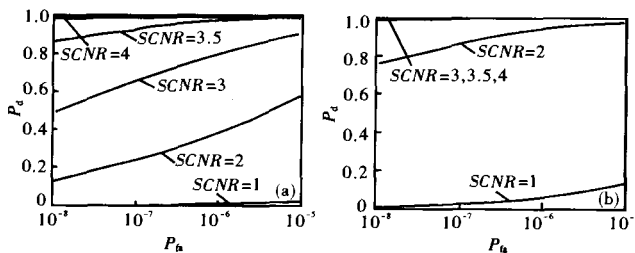


图 1 理想三维搜索检测算法性能 ROC 曲线

Fig.1 ROC of ideal 3D detection algorithm

## 2 基于观测样本的三维搜索检测算法及其性能分析

### 2.1 算法描述

在上面的理想检测算法中,默认假设目标均值已知,噪声方差已知,但事实上这些参数均未知,只知道轨迹上的样本观测值。在这种情况下,不能采用前面所述的理想检测算法,因此,研究了以下实用的基于三维时空目标轨迹搜索的检测算法。

考虑二元假设问题:

$H_0$  轨迹  $S$  非目标运行轨迹

$H_1$  轨迹  $S$  为目标运行轨迹

由分析可知,当  $S$  非目标轨迹时,其均值为 0,当  $S$  为目标轨迹时,其均值为  $K\mu$  ( $\mu$  未知但  $\mu \neq 0$ )。

故上述二元假设问题等价于:

$H_0 \mu = 0$

$H_1 \mu \neq 0$

记  $H_0$  所对应的参数子空间为  $\Theta_0$ ,  $H_1$  所对应的参数子空间为  $\Theta_1$ ,考虑最大似然比统计量:

$$\lambda(I) = \frac{\text{Sup}_{\Theta_1} (f(\Pi H_1))}{\text{Sup}_{\Theta_0} (f(\Pi H_0))} \quad (16)$$

$$f(\Pi H_1) = (2\pi\sigma^2)^{-\frac{K}{2}} \exp\left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^K (Z_i - \mu)^2 \right\} \quad (17)$$

为计算  $f(\Pi H_1)$  在参数子空间  $\Theta_1$  上的上趋界,令:

$$\frac{\partial f(\Pi H_1)}{\partial \mu} = 0 \quad (18)$$

可得:

$$\mu = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K Z_i \quad \text{记为 } \bar{I} \quad (19)$$

令:

$$\frac{\partial f(\Pi H_1)}{\partial \sigma^2} = 0 \quad (20)$$

可得:

$$\sigma^2 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (Z_i - \bar{I})^2 \quad \text{记为 } \bar{S}^2 \quad (21)$$

公式(19)和(21)中,  $\bar{I}$ 称为样本均值;  $\bar{\sigma}^2$ 称为样本方差。

将公式(19)和(21)代入公式(17),有:

$$\text{Sup}_{(\mu, \sigma^2) \in \Theta_1} f(\Pi H_1) = \left( 2\pi \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (Z_i - \bar{I})^2 \right)^{-K/2} \exp(-K/2) \quad (22)$$

同理,

$$f(\Pi H_0) = (2\pi\sigma^2)^{-\frac{K}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^K Z_i^2\right) \quad (23)$$

为计算  $f(\Pi H_0)$  在参数子空间  $\Theta_0$  的上趋界,令:

$$\frac{\partial f(\Pi H_0)}{\partial \sigma^2} = 0 \quad (24)$$

可得:

$$\sigma^2 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K Z_i^2 \quad (25)$$

将公式(24)、(25)代入公式(23),有:

$$\text{Sup}_{(\mu, \sigma^2) \in \Theta_0} f(\Pi H_0) = \left( 2\pi \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (Z_i^2) \right)^{-\frac{K}{2}} \exp(-K/2) \quad (26)$$

故最大似然比统计量:

$$\lambda(I) = \frac{\text{Sup}_{\Theta_1} (f(\Pi H_1))}{\text{Sup}_{\Theta_0} (f(\Pi H_0))} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^K (Z_i - \bar{I})^2}{\sum_{i=1}^K Z_i^2} \right]^{-K/2} = \left[ 1 + \frac{\bar{I}^2}{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (Z_i - \bar{I})^2} \right]^{K/2} = \left[ 1 + \frac{\bar{I}^2}{K-1} \right]^{K/2} \quad (27)$$

式中  $l = \frac{\bar{I}}{s/\sqrt{K-1}}$ ,可以证明,  $l$ 服从中心  $t(n-1)$ 分布。

观察公式(27)可知,最大似然比统计量  $\lambda(I)$ 是关于  $|l|$ 的严格单调递增函数,故对统计量  $\lambda(I)$ 的检验可以转化为对其充分统计量  $|l|$ 的检验。采用恒虚警率检测方法,具体步骤为:

(1) 设恒虚警概率为  $P_{fa}$ ,由于  $|l|$ 为双边检测,故

单边的虚警概率为  $\frac{1}{2} P_{fa}$ ;

(2) 查  $t$ 分布表,找出对应的判决门限  $\eta$ ;

(3) 若充分统计量  $|l(I)| > \eta$ ,则判为有目标,否则判为无目标。

### 2.2 算法检测性能分析

为评估这种检测算法的实际检测性能,进行了大量的蒙特卡罗仿真实验。在实际应用中需要首先对图像进行背景校正、背景抑制及白化等处理,但在仿真实验中为方便进行性能评估,忽略了这一步。在实验中,随机产生了10帧图像序列,图像大小为  $256 \times 256$ ,其噪声服从独立高斯分布,并在图像上叠加了三个不同运动方向的点状运动目标。对此种算法,考虑了  $SCNR=2, 3, 4$ 等三种不同信噪杂波比情况下的检测性能,进行了多次独立蒙特卡罗仿真实验,其结果如图2所示

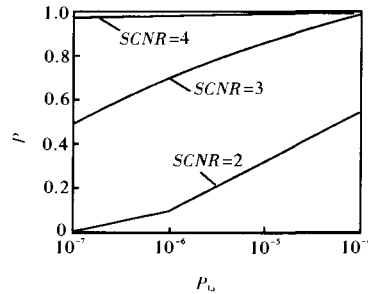


图2 文中采用的三维搜索检测算法性能 ROC 曲线

Fig.2 ROC of presented algorithm

由于事先并不知道目标亮度的平均值和噪声的方差,需要通过观测样本来估计。估计误差将会导致文中采用的三维搜索检测算法的性能比理想情况有所降低。这一点,通过图1(b)和图2中结果的对比可见。另外,两者性能异同点如表1所示。

### 3 存在的问题及其解决方案

在上面的分析过程中,隐含假设目标的运行轨迹是已知的,在这种情况下,信号信息没有任何损失,因而获得的检测性能是最佳的。事实上,目标运行轨迹是未知的,需要进行穷举搜索检测。若令  $Q=M \times N$ 为单帧图像中包含的像素点的总个数,则在一组连续的  $K$ 帧图像序列中,可能存在的轨迹有  $Q^K$ 种,需要对每条轨迹进行二元判决,计算量很大。因此,减少计算

量,提高算法的实时性是在工程应用中的关键问题。对此,可以采用沿时间轴投影变换的方法<sup>[3]</sup>,即先将三维图像序列映射到二维组合图像中,再在组合图像上进行二维搜索检测。这样,在组合帧内,可能存在的轨迹数有  $C_0^k$  种,从而大大减少计算量,有利于实时实现。

表 1 理想算法和文中算法检测性能上的异同点

Tab.1 Differences and similarities between ideal and presented algorithm

	Ideal algorithm	Presented algorithm
Probabilistic distribution of the statistic	Gaussian distribution	$t$ -distribution
Storage	$K(\text{frame})$	$K(\text{frame})$
Computational complexity ( $O(\cdot)$ is the operator)	$O((M \times N)^k)$	$O((M \times N)^k)$
Required terms	Background clutter must be suppressed and whitened; Mean value of target intensity and variance of noise must be foreknown; Exhaustive search required for target trajectory.	Background clutter must be suppressed and whitened; No need to foreknown the mean value of target intensity and variance of noise, but those are estimated from the raw data; Exhaustive search required for target trajectory.

#### 参考文献:

- [1] POHLIG S C. Spatial-temporal detection of electro-optic moving targets[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic System, 1995, 31(2):608-616.
- [2] Blostein S D, Huang T S. Detecting small, moving objects in image sequences using sequential hypothesis testing[J]. IEEE Trans On Signal Processing, 1991, 39(7):1611-1629.
- [3] Askar, LI Zai-ming. A dim moving point target detection technique based on distribution function transform method[J]. Systems Engineering and Electronic(艾斯卡尔,李在铭.最优分布变换与微弱微弱点状运动目标检测技术.系统工程与电子技术), 2003, 25(1):103-106.
- [4] WEI P, KU W. Analysis of multi-frame target detection using pixel statistics[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic System, 1995, 31(1):238-246.
- [5] LI Zhi-yong, SHEN Zhen-kang, YANG Wei-ping, et al. Dynamic Image Analysis[M]. Beijing: National Defence Industry Press(李智勇,沈振康,杨卫平,等.动态图像分析.北京:国防工业出版社), 1999. 151-165.
- [6] CHEN Ying, LI Zai-ming. Detection and tracking of dim moving point targets in IR image sequences[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China(陈颖,李在铭.图像序列中微弱点状运动目标检测与跟踪技术研究.成都:电子科技大学), 2002.
- [7] LIU Zhi-gang, LU Huan-zhang, CHEN Hui-huang. Point target detection algorithm based on multistage velocity matching[J]. Infrared and Laser Engineering(刘志刚,卢焕章,陈辉煌.基于分段复合速度匹配的点目标检测算法.红外与激光工程), 2004, 33(4):366-370.

(上接第 477 页)

- 网络的点目标多光谱信息融合识别方法.光学精密工程), 2003, 11(4):412-415.
- [9] Fonseca L M G, Manjunath B S. Registration techniques for multi-sensor remotely sensed imagery[J]. Photogramm Eng Remote Sensing, 1996, 62(9):1049-1056.
  - [10] ZHANG Kun-hua. Technologies of recognizing and tracking extended target in complex environment[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences(张坤华.复杂背景下扩展目标识别与跟踪技术研究.成都:中国科学院光电技术研究所), 2003.
  - [11] HUANG Lin-mei, ZHANG Gui-lin, WANG Xin-yu. Detecting of small infrared moving object based on dynamic programming algorithm[J]. Infrared and Laser Engineering(黄林梅,张桂林,王新余.基于动态规划的红外运动小目标检测算法.红外与激光工程), 2004, 33(3):302-306.
  - [12] PENG Zhen-ming. Study on the effective method for dynamic target detection and tracking with faint imaging in clutter[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences(彭真明.强杂波、弱信息动态成像目标检测与稳定跟踪技术研究.成都:中国科学院光电技术研究所), 2003.