

文章编号: 0253-2239(2009)09-2402-06

一种空间目标在轨检测图像预处理算法

潘海斌 张 伟 丛明煜 程军 孟祥龙 曹移明

(哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 通过对美国天基可见相机(SBV)在轨检测算法(Moving target indicator, MTI)算法进行改进,使其更加快速有效地检测出淹没在噪声杂波中的目标条纹。MTI改进算法使用了一种新的二维图像检测预处理算法——依概率加窗检测算法。依概率加窗检测算依据同一大小检测窗口内,目标所在检测窗内出现的非零点比纯噪声检测窗内多的特性,通过检测窗门限滤波,在可能剔除部分目标点的同时,极大地抑制噪声。接着使用三点共线条纹检测算法,剔除可疑目标条纹,进一步降低虚警概率,提高检测概率。通过算法性能分析可知,MTI改进算法的虚警概率降低 15 倍,检测概率 99% 时所需信噪比从 6 降低为 3,并且总体计算量降低 6 个数量级。MTI改进算法减少计算量的同时,降低虚警概率并提高检测概率,在工程应用中更有利于算法的实时实现。

关键词 图像处理;空间光学;在轨检测算法;依概率加窗检测;图像预处理;天基可见光相机;空间目标

中图分类号 TP751 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092909.2402

Image Preprocessing Algorithm for Space Target Space-Based Detection

Pan Haibin Zhang Wei Cong Mingyu Chen Jun Meng Xianglong Cao Yiming

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Space-based detection algorithm in American SBV named moving target indicator (MTI) algorithm was improved. The improved algorithm could detect target streak ‘submerged’ in noise and clutter more quickly and more effectively. MTI improved algorithm used a new two-dimensional image detection preprocessing algorithm named windowed detection in probability algorithm. There were more the non-zero points in target detection window than in pure noise detection window with the same size. According to the characteristic, windowed detection in probability algorithm used threshold filter in detection window. The threshold filter extremely suppressed noise along with eliminating portion target points. Then, doubtful target streak was eliminated by three-point collinear streak detection algorithm. The streak detection algorithm reduced false-alarm probability and increased detection probability. By algorithm was performance analysis, false-alarm probability of MTI improved algorithm was reduced fifteen times than MTI algorithm, and needed signal-to-noise ratio (SNR) was reduced from 6 to 3 when detection probability equals to 99%. Furthermore, the calculation amount of MTI improved algorithm was reduced six order of magnitude than MTI algorithm. According to algorithm performance, MTI improved algorithm avails real-time processing in engineering application.

Key words image processing; space optics; space-based detection algorithm; windowed detection in probability; image preprocessing; space-based visible sensor; space target

1 引 言

美国“空间中段试验”卫星(MSX)上的天基可见光相机(SBV)开辟了天基空间监视的先河^[1~4],可实现对多种常驻空间目标的搜索、探测、跟踪和数

据采集。其主要执行的任务有:新近发射飞行器的数据采集和跟踪;近地空间和深空空间目标的编目维持与增加更新^[4~7]。

SBV相机的在轨技术演示成功验证了星上信

收稿日期: 2009-02-23; 收到修改稿日期: 2009-03-06

基金项目: 国家 863 计划(2006AA1280)资助项目课题。

作者简介: 潘海斌(1979—),男,博士研究生,主要从事空间目标背景特性及检测算法方面的研究。

E-mail: hitphb@126.com

导师简介: 张 伟(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事空间光学工程方面的研究。E-mail: wzhang@hit.edu.cn

号处理技术的可行性。SBV 相机通过凝视空间某一区域来收集时间序列的帧图像数据。一个时间序列的帧图像数据称之为帧数据包，帧数据包相当于 16 frame，共包含三百万像素数据量。SBV 相机中信息处理系统(核心为 MTI 算法)在 16 s 内对帧数据包进行分析处理，只保留几百比特与空间目标有关的数据^[8~11]。

本文介绍 MTI 算法流程步骤及算法性能。通过对 MTI 算法流程中某些子算法的更新替换，使改进算法快速有效地检测出淹没在噪声杂波中的目标条纹，在性能上得到较大的提高。

2 MTI 算法

图 1 给出经 MTI 算法处理前后的图像对比，图中固定点源为探测到的自然星，条纹为人造卫星^[12]。

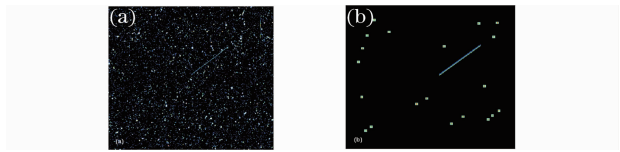


图 1 MTI 算法处理前后图像的对比。

(a) 原始图像；(b) 处理后的图像

Fig. 1 Comparison of original image with processed image by MTI. (a) original image; (b) processed image

MTI 算法流程如图 2 所示，对输入的时间序列图像作如下具体处理^[13]：

1) 进行最大值投影：

$$z(x) = \max[r'(x, t), t = 1, \dots, N]. \quad (1)$$

2) 得到除了最大值以外的图像的均值：

$$\overline{\text{mean}(x)} = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{t=1}^N r'(x, t) - z(x) \right]. \quad (2)$$

3) 从最大值中减掉均值：

$$z'(x) = z(x) - \overline{\text{mean}(x)}. \quad (3)$$

4) 标准化：

$$z''(x) = z'(x) / S. \quad (4)$$

式中 S 为噪声标准差。

5) 标准化图像进行滤波并二元量化：

$$\begin{cases} b(x) = 1, & \text{if } z''(x) + z''(x+1) > T \\ & \text{or } z''(x) + z''(x+1+N_{\text{row}}) > T \\ & \text{or } z''(x) + z''(x+N_{\text{row}}) > T \\ & \text{or } z''(x) + z''(x-1+N_{\text{row}}) > T \\ b(x) = 0. & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

式中 N_{row} 为图像行像素数。

6) 改变二进制图像的倾斜角，一般每次旋转 9° 。如果没有可用的先验信息，旋转 20 次，覆盖 180° ，即所有可能的条纹角度范围。如果有先验信息，则可决定每次旋转角度或旋转次数，从而减少处理时间；

7) 每旋转一个角度，进行纵向一维匹配滤波，检测从 5 个像素/列到 420 个像素/列的所有速度；

8) 对每个检测到的条纹，使用最大似然比测试方法，扩展其长度，尝试连接共线的条纹段。

9) 对每个扩展后的条纹，重新调用二元量化图像，沿着条纹路径，计算条纹路径上非零点数量之和，并与标定门限值比较，如果小于门限值，则放弃该条纹路径。

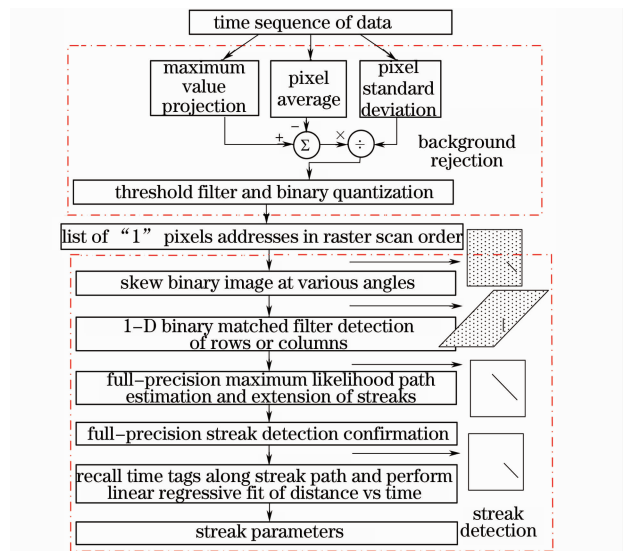


图 2 MTI 算法流程

Fig. 2 Flow chart of MTI algorithm

图 3 给出 MTI 算法在虚警概率等于 5 时，检测概率与原始数据信噪比关系。从图中可看出 MTI 算法检测性能不高，信噪比大于 6 时，检测概率才达到 99%^[14]。

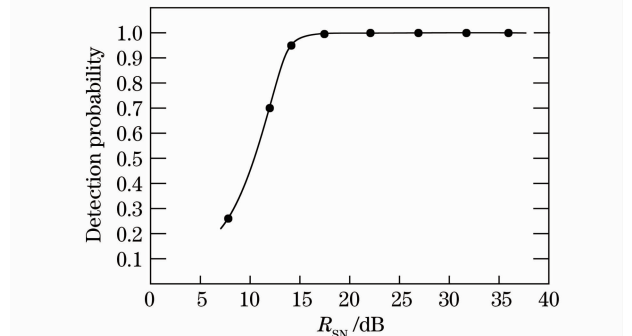


图 3 MTI 算法检测概率与信噪比关系

Fig. 3 Relation of R_{SN} with detection probability of MTI algorithm

3 MTI 改进算法

如图 4 所示,MTI 改进算法在背景剔除算法方面不变,对最大值投影图像与平均值投影图像进行背景抑制算法,产生一帧新的投影图像。其中与运动目标相关的条纹被保留,而非运动目标被剔除。接着对新的投影图像进行门限滤波,抑制噪声,剔除低幅值噪声点。

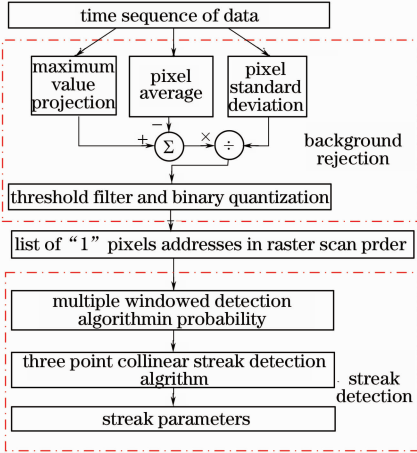


图 4 MTI 改进算法流程

Fig. 4 Flow chart of MTI improved algorithm

MTI 改进算法使用了新的二维图像检测预处理算法—依概率加窗检测算法,在可能剔除部分目标点的同时,极大抑制噪声,使得噪声点数均值在 10 个以下。针对图像中虚警点数量极少的特点,MTI 改进算法使用三点共线条纹检测算法,剔除可疑目标条纹,进一步降低虚警概率,提高检测概率。

3.1 依概率加窗检测算法

如 5 图所示,依概率加窗检测算法的基本原理

是:门限检测时目标所在像元比纯噪声像元通过门限的概率大($R_{SN} > 0$),因此在同一大小检测窗口内,目标所在检测窗内出现的非零点比纯噪声检测窗内多。将检测窗通过非零点个数门限滤波,就可剔除噪声。

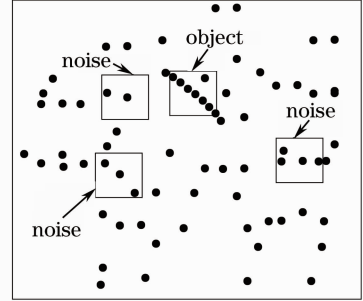


图 5 依概率加窗检测算法原理

Fig. 5 Principle of windowed detection algorithm in probability

依概率加窗检测算法的目的是通过检测窗非零点像元数门限滤波剔除噪声,因此首先需要计算目标检测窗与纯噪声检测窗通过门限的概率。本文称目标检测窗通过门限的概率为检测窗检测因子 D ,纯噪声通过门限的概率为虚警因子 F 。假定依概率加窗检测算子检测前,检测概率为 P_d 与虚警概率为 P_f 则,检测后目标检测概率 $P_D = P_d D$,虚警概率 $P_F = P_f F$ 。

3.1.1 检测窗虚警因子与检测因子

在大小为 $n \times n$ 的检测窗口内,纯噪声检测窗口内出现 m 个非零点($0 \leq m \leq n \times n$) 的概率为

$$P_{n_w}(m) = \frac{(n \times n)!}{m!(n \times n - m)!} P_f^m (1 - P_f)^{(n \times n - m)}. \quad (6)$$

根据(6)式,可以计算得到纯噪声检测窗口内至少出现 m 个非零点的概率为

$$\begin{aligned} P_{n_w}(\geq m) &= 1 - P_{n_w}(< m) \\ &= 1 - \sum_{k=0}^{m-1} \frac{(n \times n)!}{k!(n \times n - k)!} P_f^k (1 - P_f)^{(n \times n - k)}. \end{aligned} \quad (7)$$

同理,可以计算得到 $n \times n$ 目标检测窗口内至少出现 m 个非零点的概率:

$$\begin{aligned} P_{t_w} &= 1 - \sum_{L=0}^{m-1} \sum_{k=0}^L \left[\frac{n!(n^2 - n)!}{k!(n - k)!(L - k)!(n^2 - n - L + k)!} \right. \\ &\quad \left. \times P_d^k (1 - P_d)^{(n-k)} P_f^{(L-k)} (1 - P_f)^{(n^2 - n - L + k)} \right], \quad 1 \leq m \leq n \end{aligned} \quad (8)$$

根据(6)式与(8)式,给定非零点个数门限 M_t ,则检测因子 D 与虚警因子 F 分别为

$$D = 1 - \sum_{L=0}^{M_t-1} \sum_{k=0}^L \left[\frac{n!(n^2 - n)!}{k!(n - k)!(L - k)!(n^2 - n - L + k)!} \times P_d^k (1 - P_d)^{(n-k)} P_f^{(L-k)} (1 - P_f)^{(n^2 - n - L + k)} \right], \quad (9)$$

$$F = 1 - \sum_{k=0}^{M_t-1} \frac{(n \times n)!}{k!(n \times n - k)!} P_f^k (1 - P_f)^{(n \times n - k)}. \quad 1 \leq M_t \leq n \quad (10)$$

3.1.2 依概率加窗检测算法构造

对二维图像非零点像元为中心的 $n \times n$ 检测窗口内计算非零点像元数,表达式如下:

$$m = \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-n}^n f_c(x_i, y_j),$$

$$f_c(x_i, y_j) > 0, n \leq x_i \leq L_F - n, n \leq y_j \leq W_F - n$$
(11)

式中 m 为检测窗口内非零点个数; L_F 为二维图像的长度; W_F 为二维图像的宽度。

假如检测窗口内非零点像元数大于设定的门限 M_t , 则保留检测窗口中心像元位置数据, 赋值为 1。否则, 剔除小于门限 M_t 的检测窗口内数据, 清零。表达式如下:

$$f(x_i, y_j) = \epsilon[f_c(x_i, y_j)] = \begin{cases} 1, & m \geq M_t \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$
(12)

式中 ϵ 为依概率加窗检测算子。

为了再次降低虚警率, 本文构造了多重依概率加窗检测算子, 构造方法如下:

$$f_k(x_i, y_j) = \epsilon_k[f_{k-1}(x_i, y_j)] = \begin{cases} 1, & m_k \geq M_{tk} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$
(13)

式中 ϵ_k 为第 k 重依概率加窗检测算子; m_k 为第 k 重检测窗非零点像元数; M_{tk} 为第 k 重检测窗门限。

给定检测窗大小 n 、非零点像元数检测门限 M_t 、检测概率 P_d 与虚警概率 P_f 时, 表 1 给出了多重依概率加窗检测算法的检测结果。

表 1 多重依概率加窗检测算法检测结果

Table 1 Detection result of multiple windowed detection algorithm in probability

Input	$n=3, M_t=2$	$3 \leq n \leq 9,$ $M_t=3$	Output
$P_d=0.5088$	$D=0.3425$	$D=0.6948$	$P_D=0.1210$
$P_f=0.029$	$F=0.0209$	$F=0.0427$	$P_F=2.58e-5$

$P_d=0.5088, P_f=0.029$ 对应的二元量化滤波门限等于 3, 信噪比等于 3σ 。

3.2 三点共线条纹检测算法

本文设定三点共线条纹检测的检测概率等于 100%。三点共线条纹检测的虚警情况如图 6 所示, 存在两个虚警点 A_1, A_2 , 则三点共线的情况是第三点在 A_1A_2 的延长条纹 A_3A_4 上, 而 $A_3A_4 \leq 420$ pixel, 因此第三点在 A_3A_4 线上的概率小于等于 $1/420$, 为便于计算可视为等于 $1/420$ 。因此三点共线条纹检测的虚警概率可表达为

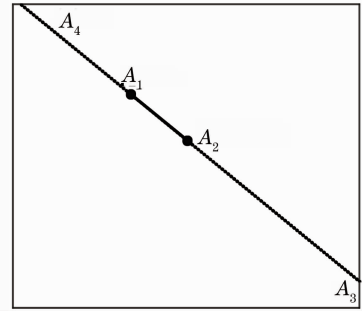


图 6 三点共线条纹检测算法

Fig. 6 Three-point collinear streak detection algorithm

$$P_{L_total3} = \frac{1}{420} \times P_f(3),$$
(14)

式中 $P_f(3)$ 表示依概率加窗检测后图像中只存在三个虚警点的概率。总的虚警概率等于图像中存在 m 个噪声点与 n 个目标点的 3 点共线条纹检测概率, 表达式如下:

$$P_{L_total} = \sum_{i=1}^{m-2} P_f(i+2) \times \frac{i}{420} + \sum_{k=1}^n P_d(k) \times \frac{1}{420}$$

$$= \sum_{i=1}^{m-2} P_f(i+2) \times \frac{i}{420} + \frac{P_d(\geq 1)}{420}.$$

$$m \rightarrow +\infty$$
(15)

根据设定, 三点共线条纹检测的检测概率为 100%, 因此总的检测概率为

$$P_{d_total} = P_d(\geq 3).$$
(16)

4 MTI 改进算法性能分析及仿真

4.1 MTI 改进算法检测性能分析

当图像大小为 $420 \text{ pixel} \times 420 \text{ pixel}$ 时, 多重依概率加窗检测算子检测后, 在新图像上存在的虚警噪声点数如表 2 所示。从表中可看出虚警噪声点数小于 14 的概率为 99.971%。

表 2 虚警噪声点数

Table 2 Number of false-alarm noise points

Noise points	Probability	Noise points	Probability
≥ 1	0.9894	≥ 8	0.0908
≥ 2	0.9414	≥ 9	0.042
≥ 3	0.8320	≥ 10	0.0183
≥ 4	0.6662	≥ 11	0.0070
≥ 5	0.4775	≥ 12	0.0026
≥ 6	0.3058	≥ 13	8.902×10^{-4}
≥ 7	0.1755	≥ 14	2.8122×10^{-4}

对于单帧条纹长度为 5, $R_{SN}=3$ 的图像, 多重依概率加窗检测算子检测后在新图像上存在的目标点数如表 3 所示。

表 3 目标点数

Table 3 Number of object points

Noise points	Probability	Noise points	Probability
≥ 1	0.9999	≥ 8	0.7666
≥ 2	0.9996	≥ 9	0.6431
≥ 3	0.9976	≥ 10	0.5070
≥ 4	0.9905	≥ 11	0.3741
≥ 5	0.9717	≥ 12	0.2577
≥ 6	0.9325	≥ 13	0.1655
≥ 7	0.8649	≥ 14	0.0991

将表 2 与表 3 的数据代入(15)式和(16)式,就可以计算得到 $R_{SN}=3$, 二元量化滤波门限也等于 3 时,MTI 改进算法的总的检测概率为 99.77%、总的虚警概率为 1.1%。图 7、图 8 给出二元量化滤波门限等于 3 时,不同信噪比下不同条纹投影像元数的检测概率与虚警概率。

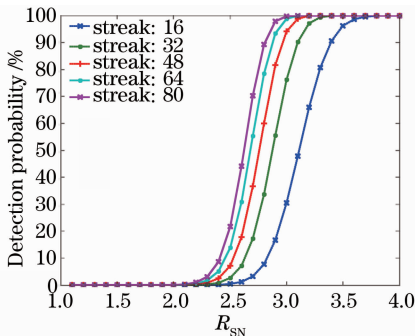


图 7 不同信噪比下不同条纹像元数的检测概率

Fig. 7 Detection probability with different project streak length in different R_{SN}

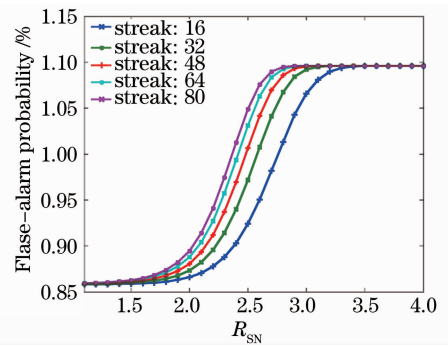


图 8 不同信噪比下不同条纹像元数的虚警概率

Fig. 8 False-alarm probability with different project streak length in different R_{SN}

4.2 MTI 改进算法计算量

MTI 算法搜索条纹路径的总数等于开始点的数目(420×420)乘以条纹长度数目(420)乘以角度数目(20)^[15],即 1.48×10^9 ,并在条纹路径上作逻辑与运算与假设判断。MTI 改进算法是基于依概率加窗检测算法进行虚警点的剔除,不直接进行条纹搜索。第一重依概率加窗检测算法的计算量为 $420 \times 420 \times 0.029$,第二重依概率加窗检测算法的计算量为 $420 \times 420 \times 0.029 \times 0.0209$ 。三点共线条纹的计算量小于两个数量级。因此 MTI 改进算法只需要在 5.22×10^3 个检测窗内条纹路径上作逻辑与运算与假设判断。表 4 给出 MTI 改进算法与 MTI 算法计算量的对比。

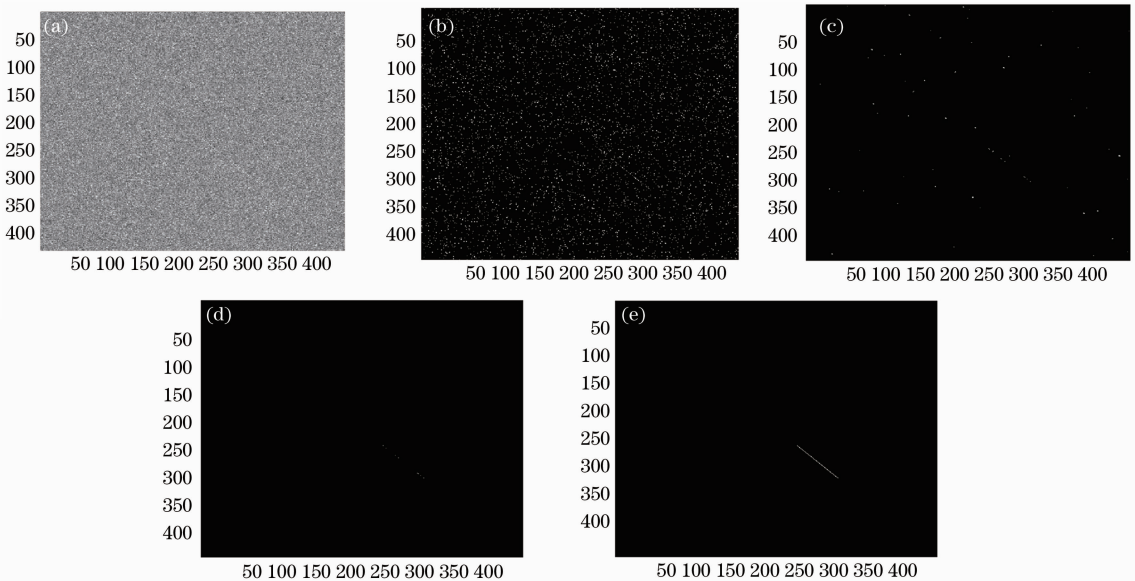


图 9 16 帧叠加原始图像(a);门限滤波二元量化后图像(b);第一重依概率加窗检测算法检测结果(c);第二重依概率加窗检测算法检测结果(d);MTI 改进算法检测结果(e)

Fig. 9 Superposed original image of 16 frames(a); image after threshold filter and binary quantization (b); detection result of first windowed detection (c); detection result of secondary windowed detection (d); detection result of MTI improved algorithm (e)

表 4 MTI 改进算法与 MTI 算法计算量对比

Table 4 Comparison of calculation amount of MTI improved algorithm to that of MTI algorithm

	improved algorithm	MTI algorithm
Calculation amount	5.22×10^3	1.48×10^9

4.3 MTI 改进算法数值仿真

MTI 改进算法数值仿真如图 9 所示。

5 结 论

为了减少二维检测搜索的计算量,本文提出一种新的二维图像检测预处理算法——依概率加窗检测算子。依概率加窗检测算子根据多重检测窗口内目标点检测概率与噪声点的虚警概率不同的特点,通过门限剔除噪声点,提取目标点,极大抑制噪声,使得噪声点数均值在个位数。有利于二维图像检测算法的实时实现。

基于依概率加窗检测算子与三点共线条纹检测算法,对 SBV 相机的 MTI 算法进行改进。MTI 改进算法减少计算量的同时,降低虚警概率并提高了检测概率,有一定的工程应用价值。

参 考 文 献

- Zhang Keke, Zhou Feng, Fu Danying. Research on space-based space surveillance visible sensor [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2005, **26**(4): 10~13
张科科,周峰,傅丹鹰. 天基空间目标监视可见光遥感器研究 [J]. *航天返回与遥感*, 2005, **26**(4): 10~13
- Qiao Kai, Wang Zhile, Cong Mingyu. Analysis on space based and ground based surveillance system to space target [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(5): 744~749
乔凯,王治乐,丛明煜. 空间目标天基与地基监视系统对比分析 [J]. *光学技术*, 2006, **32**(5): 744~749
- Li Ying, Zhang Zhanyue, Fang Xiuhua. Development status and prospect of space object surveillance system [J]. *International Outer-Space*, 2004, **6**: 28~32
李颖,张占月,方秀花. 空间目标监视系统发展现状及展望 [J]. *国际太空*, 2004, **6**: 28~32
- Wang Jiejuan, Yu Xiaohong. The current development and characteristics analysis of foreign space-based space surveillance [J]. *J. the Academy of Equipment Command & Technology*,

2006, **17**(4): 33~37

王杰娟,于小红. 国外天基空间目标监视研究现状与特点分析 [J]. *装备指挥技术学院学报*, 2006, **17**(4): 33~37

- Ming Ying, Jiang Jingju. Background modeling and moving-objects detection based on cauchy distribution for video sequence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 587~592
明英,蒋晶珏. 基于柯西分布的视频图像序列背景建模和运动目标检测 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 587~592
- Guan Zhiqiang, Chen Qian, Qian Weixian *et al.*. An adaptive background adjusting algorithm for dim target detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2163~2168
管志强,陈钱,钱惟贤等. 一种背景自适应调整的弱点目标探测算法 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2163~2168
- Peng Huafeng, Chen Jing, Zhang Bin. Limited magnitude detectivity of space-based opto-electronic telescope [J]. *Opto Electronic Engineering*, 2007, **34**(8): 1~5
彭华峰,陈鲸,张彬. 天基光电望远镜极限星等探测能力研究 [J]. *光电工程*, 2007, **34**(8): 1~5
- Pan Haibin, Cong Mingyu, Zhang Wei *et al.*. Imaging model study of space objects from space remote sensor [J]. *J. Harbin Institute of Technology*, 2008, **40**(11): 1699~1702
潘海斌,丛明煜,张伟等. 航天遥感器的空间目标成像模型研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, **40**(11): 1699~1702
- Wang Hongyuan, ZhangWei, Wang Zhile. Visible characteristics of space satellite based on Nth cosine scattering distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 594~598
汪洪源,张伟,王治乐. 基于高次余弦散射分布的空间卫星可见光特性 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 594~598
- Qi Changsong, Liu Enhai, Zhong Jianyong. Discussion on space-based deep space small moving target detection [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(5): 29~32
漆长松,刘恩海,钟建勇. 天基平台深空运动小目标检测 [J]. *光电工程*, 2008, **35**(5): 29~32
- Zhou Yanping, Tao Kunyu, Qu Xiaotong *et al.*. Multi-sensor joint detection in space-based pointing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(6): 1003~1008
周彦平,陶坤宇,曲晓彤等. 天基目标瞄准多传感器联合探测 [J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(6): 1003~1008
- Zhou Yiyu, Li Jun, An Wei. Information processing technology in optical space-based space surveillance [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(4): 43~48
周一宇,李骏,安玮. 天基光学空间目标监视信息处理技术分析 [J]. *光电工程*, 2008, **35**(4): 43~48
- Pan Haibin, Zhang Wei, Cong Mingyu. Detection algorithm for space dim moving object [C]. *SPIE*, 2007, **6595**(1): H1~H8
- Peter L. Chu. Efficient detection of small moving objects [J]. *MIT Lincoln Laboratory*, 1989: 3~44
- Peter L. Chu. Optimal projection for multidimensional signal detection [J]. *IEEE Trans. Acoustics Speech Signal Process*, 1988, **36**(5): 775~786