

文章编号 1004-924X(2012)04-0826-09

云杂波成像背景的时序多帧投影抑制

丛明煜, 何文家*, 鲍文卓, 张寅, 王刚

(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:为提高空间目标天基实时监视能力,对美国在空间中段实验卫星上搭载的空间目标在轨检测与跟踪信号处理器采用的基于时序多帧投影策略的 MTI (Moving Target Indicator)算法进行了深入研究,并提出了一种基于时序差分标准化最大值投影的云杂波背景抑制算法。系统地阐述了时序多帧投影算法的思想与典型投影算子的设计方法;针对云杂波成像场景,对 MTI 算子提出了两点改进方法,即引入相邻帧差分算子与次序统计量中值估计算子来提高对云杂波成像背景的抑制能力,增强背景抑制算法的稳健性;最后,利用实际获取的云层背景图像数据库,仿真比较了不同投影算法的性能差异及影响算法性能的主要因素。仿真实验结果表明:对于输入信杂比小于 2.0 的弱小目标图像,本文算法的输出信杂比达到 5.8 以上,比 MTI 算法平均提高了 1.0 左右,有效解决了云杂波成像背景的弱小目标检测问题。

关键词:云杂波背景抑制;时序多帧投影;图像序列;运动目标

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122004.0826

Suppression of cluttered cloud image background by time series multi-frame projection

CONG Ming-yu, HE Wen-jia*, BAO Wen-zhuo, ZHANG Yin, WANG Gang

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

* Corresponding author, E-mail: andyhe06@126.com

Abstract: To improve the capability of space-based surveillance for space targets, this paper researches the Moving Target Indicator (MTI) based on time-domain projecting image sequences for suppressing starry sky background. The MTI has been used in a spaceborn signal processor on the USA Midcourse Space Experiment for target detection and tracking. According to the in-depth study of MTI algorithm, a new method is proposed to suppress the background of cluttered cloud based on the standardized maximum projection of temporal difference. The mathematical principle and the operator design method of temporal projection are given. Then, considering the statistical characteristics of cluttered cloud, the two Improved MTIs (IMTIs), namely, the temporal difference operator on an adjacent frame and the estimated median operator, are introduced to the MTI to enhance the clutter suppression. Finally, the experimental method based on the cloud background data acquired is designed to analyze the algorithm performance of different projection methods as well as the main factors affecting on the algorithm. The experimental results show that the output Signal-to-clutter Ratio (SCR) of IMTI

收稿日期:2011-10-18;修订日期:2011-12-02.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA704215)

reaches more than 5.8 when the input SCR of a small target is less 2.0, which has been improved by 1 in average as compared with that of MTI. It concludes that the IMTI can effectively solve the dim target detection problem of cluttered cloud image background.

Key words: cluttered cloud background suppression; time series multi-frame projection; image sequence; moving target

1 引言

复杂背景成像条件下的红外运动小目标检测技术面临的最大挑战是如何尽早、尽快地发现并且识别出目标运动轨迹。一般来讲,按照所需要的图像帧数的多少,检测算法可以分为单帧检测与多帧检测2大类。对于超远距离探测,单帧检测算法基本不能直接确定目标而只能提取出部分疑似目标点,最终还需借助时序多帧图像中目标运动的轨迹信息进行判决。这种先单帧预处理^[1-4]再多帧轨迹关联的策略虽然思路清晰,但是因为将序列图像的时间信息与空间信息完全分离开来单独进行考虑,所以相比于直接应用时空融合信息进行全维匹配滤波信噪比下降很多。研究表明,当目标的局部信杂比下降到10 dB时,这种策略将很难应用^[5]。

虽然理论上是Reed提出的全维匹配滤波的检测性能最高,但是由于其超大的计算量而在实际系统中得不到有效应用。为了解决这一问题,Chu引入了投影算法的思想,以损失一定的信噪比为代价来大幅度降低算法的计算复杂度^[6]。应用投影策略的最典型案例是美国“空间中段实验”卫星上的MTI算法,它是目前唯一成功应用在天基监视系统的在轨检测算法^[7]。MTI算法是一种典型的“先跟踪后检测”类检测算法,前一部分利用基于投影思想的MTI算子进行多帧背景抑制,后一部分利用速度滤波进行目标轨迹确认,本文的研究重点在多帧背景抑制部分。除此之外,国内的陈颖、陈非、孙立辉等人^[8-10]也设计了不同的投影算子,并结合最大似然路径查找的轨迹搜索方法分析了算法的性能。这些算法的性能分析都以背景服从高斯分布或者近似服从高斯分布为基本假设,但是实际应用中背景往往要复杂得多,所以单纯理论上的分析结果还难以准确评价算法实际应用的性能。

本文的研究成果主要体现在三个方面:一是

系统地阐述了投影算法在背景抑制技术中的研究现状;二是针对云杂波这一典型自然场景,设计出了性能优越的基于探索性数据分析的时序差分标准化最大值投影算子;三是采用仿真实验方法分析了投影策略的适用条件与主要影响因素,并总结了设计与使用投影算子的一些方法和原则。论文的具体结构安排如下:首先给出了最大值投影与求和投影的数学原理及另外几种典型投影算子的设计方法;然后针对本课题的应用背景提出了一种新的投影算子,并给出了该投影算法的实现过程;最后进行仿真实验,依据实验结果对不同算法的性能进行了比较分析。

2 投影算子的设计方法

2.1 投影算法的提出

多帧时序投影是指利用某种数学方法把序列图像帧从三维时空域有损压缩至二维空间域,得到单一组合帧图像的过程。将序列图像的灰度表示为 $r(x, y, t)$, $x=1, \dots, m$, $y=1, \dots, n$, $t=1, \dots, N$, 其中 m, n 与 N 分别表示图像的高度、宽度与序列长度。对每一个 (x, y) , 样本帧包 $\{r(x, y, t), t=1, \dots, N\}$ 将被投影到单个样本 $z(x, y)$ 。假设只包含噪声的样本是独立同分布的, 概率密度为 $p_{\text{noise}}(r(x, y, t))$; 包含信号的样本也是独立同分布的, 其概率密度为 $p_{\text{sig}}(r(x, y, t))$ 。引入对数似然比检测的方法则得到最优的投影算子:

$$z(x, y) = \log \left[\sum_{t=1}^N \frac{p_{\text{sig}}(r(x, y, t))}{p_{\text{noise}}(r(x, y, t))} \right], \quad (1)$$

如果背景仅为加性高斯白噪声, 最佳投影算子可以进一步简化成:

$$z(x, y) = \log \left[\sum_{t=1}^N e^{S \cdot r(x, y, t)} \right], \quad (2)$$

式中 S 为未投影信号的信噪比。

当 S 较大(相对于噪声标准差)时, 最大的 $r(x, y, t)$ 值将支配上式求和, 对数运算结果将得出一个接近最大的 $r(x, y, t)$ 的一个值。即:

$$z(x, y) \approx \max[r(x, y, t), t=1, \dots, N], \quad (3)$$

由此引出了样本集合中的最大值就是投影样本的最大值投影算法。

当 S 较小的时候, 指数变量 $S \cdot r(x, y, t)$ 将会很小。方程(2)可以近似为:

$$z(x, y) \approx \sum_{t=1}^N r(x, y, t), \quad (4)$$

由此引出了求和投影的概念。对加性高斯白噪声, 投影样本的噪声方差比未投影的样本方差高 N 倍, 而 2 种情况下信号的直流成分是一样的。因此, 投影样本的信噪比与未投影样本相比衰减了 $20 \lg \sqrt{N}$ dB。

2.2 几种典型的投影算子

目前研究的投影算子都是在最大值投影算子或者求和投影算子的基础上改进而来, 其中比较著名的有基于前者的 MTI 算法设计的投影算子, 和基于后者的陈颖、陈非、孙立辉设计的投影算子, 下面分别说明。

MTI 算法针对星空背景的目标探测, 设计了如下的投影算子:

$$f_c(x, y) = \frac{\max(r(x, y, t)) - \text{mean}(r(x, y, t))}{\sigma_{(x, y)}}, \quad (5)$$

式中 $f_c(x, y)$ 为投影图像在坐标 (x, y) 处的标准化灰度值, $\max(r(x, y, t))$ 、 $\text{mean}(r(x, y, t))$ 与 $\sigma_{(x, y)}$ 分别为沿时间轴的最大值、平均值与标准方差。

如果假设序列图像时域平稳, 陈颖基于相邻帧差分、再平方求和的统计结果服从卡方分布的基本假设提出了一种检测点运动目标的投影算子:

$$f_c(x, y) = \sum_{t=1}^{N-1} \left[\frac{d(x, y, t)}{\sigma_t} \right]^2, \quad (6)$$

式中 $d(x, y, t) = r(x, y, t+1) - r(x, y, t)$ 为相邻帧的像素差分, σ_t 为第 t 帧差分图像的标准方差。

陈非认为如果能够很好地估计图像背景, 可以把陈颖设计的投影算子进行改进, 得到如下的新的投影算子:

$$f_c(x, y) = \sum_{t=1}^N \left[\frac{d(x, y, t)}{\sigma_t} \right]^2, \quad (7)$$

式中 $d(x, y, t) = r(x, y, t) - r_B(x, y, t)$ 为实际图像与背景估计的差分图像, $r_B(x, y, t)$ 为第 t 帧图像的背景估计, σ_t 为第 t 帧差分图像的标准方差。

如果可以假设背景符合零均值的高斯分布, 孙立辉利用样本数据的三阶统计特性设计了如下的投影算子:

$$f_c(x, y) = \left[\frac{c_{3f}(x, y)}{\alpha_{3f}(x, y)} \right]^2, \quad (8)$$

式中 $c_{3f}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N r^3(x, y, t)$ 为三阶累积量

的均值, $\alpha_{3f}(x, y) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (r^3(x, y, t) - c_{3f}(x, y))^2}$

为三阶累积量的标准方差。

以上分析显示, 投影算子策略在国内的研究主要集中在理论方面, 重点是结合传统的假设检验理论来构造统计量作为新的投影算子。实际上如果参与投影的帧样本数量很小时, 这种高度数学化的分析方法往往并不能真实评价算法的性能, 此时算法性能的稳健性不好。MTI 算法的成功应用, 很大程度地说明了基于最大值投影策略的可行性与有效性。

3 改进 MTI 算子与算法实现过程

本文针对云杂波的应用背景对 MTI 算子进行了 2 点改进。相较于星空背景的可见光探测, 云杂波背景条件下的红外探测有其独特的性质。星空背景条件下目标探测的主要噪声源是恒星, 可以假设其亮度在较长时间内保持不变, 对于图像序列来讲, 该像素点处的均值与最大值基本相等。虽然在短时间段内也可以假设云层没有发生运动, 但是如果持续时间较长, 这种运动就不应该忽略。Alexis 指出云杂波被探测器接收的灰度值随时间的变化符合一阶马尔科夫过程, 其数学表达式如下所示:

$$r(x, y, t) = r(x, y, t-1) + \omega(x, y, t), \quad (9)$$

式中 $\omega(x, y, t)$ 为符合零均值的高斯分布^[11]。因为在进行最佳投影算子的推导时假设背景噪声服从高斯分布, 所以在云杂波背景条件下将相邻帧进行差分再投影比直接投影能够更好地接近这一基本假设。

本文相对于 MTI 算法的第二个改进之处是利用时间序列的像素中值代替像素均值进行背景杂波图像的估计。虽然均值估计由于其简单性与直观性而被广泛应用, 但越来越多的实际应用表明, 对于小样本实验数据来讲, 非参数化估计优于

参数化估计,且有更好的稳健性与耐抗性^[12-15],这一点在陈忠链翻译的《探索性数据分析》中也进行了充分的说明^[16]。

基于以上分析,本文设计了如下的投影算子:

$$f_c(x, y) = \frac{\max(r'(x, y, t)) - \text{med}(r'(x, y, t))}{\sigma_{(x, y)}} \quad (10)$$

式中 $f_c(x, y)$ 为投影图像在坐标 (x, y) 处的标准化灰度值, $r'(x, y, t) = r(x, y, t+1) - r(x, y, t)$ 表示差分序列图像, $\max(r'(x, y, t))$ 、 $\text{med}(r'(x, y, t))$ 与 $\sigma_{(x, y)}$ 分别为 $r'(x, y, t)$ 沿时间轴的最大值、中值与标准方差。

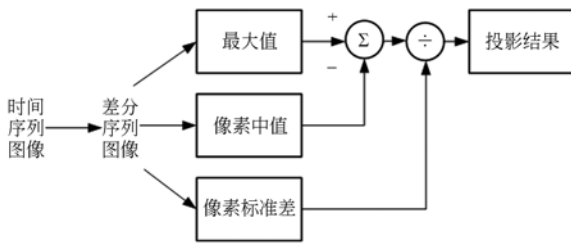


图 1 改进的 MTI 滤波框图

Fig. 1 Block diagram of improved MTI filter

本文改进的 MTI 算法框图如图 1 所示。首先,将时间序列图像的相邻帧进行差分,得到差分序列图像;其次,顶端通道生成一个最大值投影帧图像,中间通道生成中值投影帧图像,底部通道是像素标准差投影帧图像;最后把 3 个通道图像融合计算,得到单一组合帧图像即为投影结果。

假设输入的序列图像的灰度表示为 $r(\mathbf{v}, t)$, $\mathbf{v} = (x, y)$ 表示空间坐标, t 表示时间序列, $x = 1, \dots, m$; $y = 1, \dots, n$; $t = 1, \dots, N$, 则本文改进的 MTI 算法的数学计算过程如下所示:

(1) 得到差分序列图像:

$$r'(\mathbf{v}, t) = r(\mathbf{v}, t+1) - r(\mathbf{v}, t), t = 1, \dots, N-1, \quad (11)$$

式中 N 为时间序列长度。

(2) 得到最大值投影:

$$z(\mathbf{v}) = \text{maximum value of}[r'(\mathbf{v}, t), t = 1, \dots, N-1], \quad (12)$$

(3) 得到中值投影:

$$\text{med}(\mathbf{v}) = \text{median}[r'(\mathbf{v}, t), t = 1, \dots, N-1], \quad (13)$$

(4) 得到均值投影:

$$\text{mean}(\mathbf{v}) = \text{mean}[r'(\mathbf{v}, t), t = 1, \dots, N-1], \quad (14)$$

(5) 得到标准差投影:

$$S(\mathbf{v}) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^{N-1} (r'(\mathbf{v}, t) - \text{mean}(\mathbf{v}))^2}, \quad (15)$$

(6) 从最大值中减掉中值:

$$z'(\mathbf{v}) = z(\mathbf{v}) - \text{med}(\mathbf{v}), \quad (16)$$

(7) 标准化:

$$z''(\mathbf{v}) = z'(\mathbf{v}) / S(\mathbf{v}). \quad (17)$$

式中 $S(\mathbf{v})$ 为噪声标准差。上述过程思路清晰、便于模块化设计,易于软件仿真或者硬件设计。如果在求取最大值投影、中值投影与标准差投影时采用并行处理机制,还能够最大限度地降低处理时间和对存储空间的要求。

4 仿真实验设计与结果分析

3.1 实验设计与评价指标

本文采用 MODIS 天基遥感实拍的红外云层图像,利用实验室仿真生成图像序列进行算法性能分析。运动的点目标在云背景图像的基础上人工进行叠加,考虑到像元弥散特性,其能量空间分布满足如下的二维高斯型函数:

$$f(i, j) = \exp\left[-\frac{i^2 + j^2}{\sigma^2}\right], \quad (18)$$

式中 i, j 分别表示该点像素相对于中心点像素在横轴与纵轴的偏移量, σ 表示高斯函数的标准方差。在实验过程中,表示像元弥散大小的模板尺寸为 3×3 , σ 取值为 0.5。

尽管投影算法的应用背景是复杂杂波背景条件下的小目标检测,但是如果不考虑具体的轨迹搜索算法,检验投影算子性能的关键是它对背景的抑制能力。信杂比增益是衡量算法处理前后目标与背景杂波相对复杂程度的一个有效指标。

信杂比定义:

$$\text{SCR} = |G_t - G_b| / \sigma_b, \quad (19)$$

式中 G_t 和 G_b 分别表示目标区域和目标周围区域的平均灰度值, σ_b 表示目标周围区域的标准方差。这里“目标区域”是指目标中心位置的 3×3 邻域,“目标周围区域”是指目标中心位置的 21×21 邻域。

信杂比增益定义:

$$\text{ISCR} = 20 \lg(\text{SCR}_{\text{out}} / \text{SCR}_{\text{in}}), \quad (20)$$

其中, SCR_{in} 和 SCR_{out} 分别表示目标局部区域的输入信杂比和输出信杂比。

平均信杂比增益:

$$\overline{ISCR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ISCR_i, \quad (21)$$

式中 N 为投影图像中小目标的个数, $ISCR_i$ 为第 i 个小目标的信杂比增益。

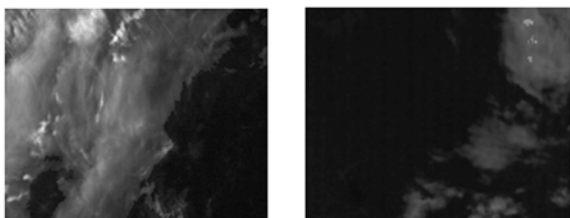
为了综合考察算法性能, 本文选取如图 2 所示的 2 幅典型拍摄场景生成图像序列, 并从目标的灰度、投影的帧数、拍摄场景与平台的相对运动以及平台高频振动产生的成像模糊 4 个方面进行仿真实验分析。在进行实验设计时, 为了有效地突出重点, 只考虑单一因素的变化对仿真实验结果的影响。具体的实验目的与设计方法如下所示:

(1) 目标灰度值的强弱反映了探测距离的远近。探测距离越远, 灰度值越低, SCR_{in} 越小。假设在拍摄场景与平台无相对运动、平台无高频振动的情况下, 考察目标的不同灰度值对算法性能的影响。

(2) 投影帧数的多少不仅影响 $ISCR$ 的大小, 而且决定了在轨检测与跟踪系统从捕获阶段过渡到跟踪阶段的时间间隔。同样假设在拍摄场景与平台无相对运动、平台无高频振动的情况下, 考察不同投影帧数对算法性能的影响。

(3) 拍摄场景与平台相对运动量较大时, 则需要进行帧间配准。假设在平台无高频振动与投影帧数一定的情况下, 考察拍摄场景与平台的相对运动对算法性能的影响。

(4) 平台高频振动产生的成像模糊也是影响成像质量的一个重要因素。假设在拍摄场景与平台无相对运动、投影帧数一定的情况下, 考察平台高频振动产生的成像模糊对算法性能的影响。



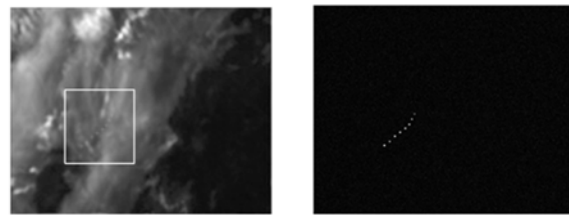
(a) 强卷云背景图像 (b) 弱卷云背景图像
(a) Background image of strong cirrus cloud (b) Background image of weak cirrus cloud

图 2 MODIS 实拍的红外图像

Fig. 2 Real IR images taken by MODIS

3.2 仿真实验结果与分析

在包含运动目标的图像序列中随机选取 7 组图像, 每组为连续的 8 帧。分别利用 MTI 算法、本文算法与陈颖算法进行处理, 其中一组图像的处理结果如图 3 所示。不难看出, 与绝大多数的单帧预处理算法相比, 投影算法在云层边缘等容易产生虚警的部分滤除杂波效果明显, 这是投影算法最突出的优势。



(a) 最大值投影 (b) MTI 算法
(a) Maximum value projection (b) MTI method



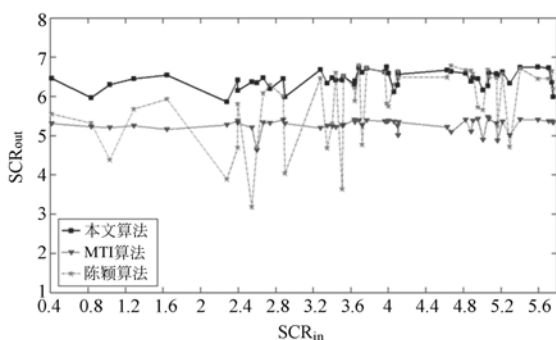
(c) 本文算法 (d) 陈颖算法
(c) Improved MTI method (d) ChenYing method

图 3 不同算法的处理结果图像

Fig. 3 Experimental images of different methods

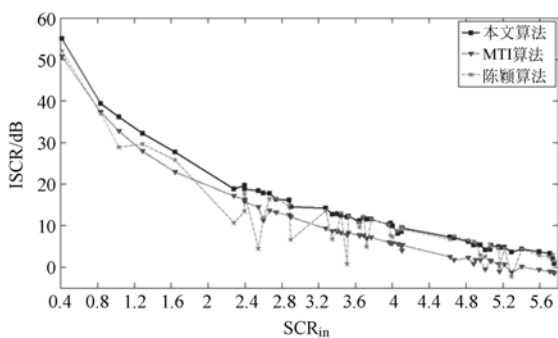
由于目标的灰度范围分布很广, 再加上局部背景的差异也很大, 因此实验数据输入各不相同的信杂比。由此得到的 SCR_{in} 与 SCR_{out} 、 SCR_{in} 与 $ISCR$ 的实验结果曲线分别如图 4(a)、4(b) 所示。

观察图 4(a) 可知虽然 SCR_{in} 在 0.4 到 5.8 之间变化很大, 但是 SCR_{out} 除震荡外基本没有显著的上升或者下降的变化趋势, 这是投影算法的独特之处, 也可以说是其对于弱小目标检测的优势所在。这一点也可以从图 4(b) 中 SCR_{in} 与 $ISCR$ 的实验结果曲线中得到直接的证实: 当 SCR_{in} 小于 1.5 时, $ISCR$ 基本大于 20.0 dB。观察图 4(a) 中 SCR_{out} 的实验结果, 另外一个显著特点是陈颖算法相对于其他 2 种算法随机震荡的幅度要明显大很多, 说明对于小样本数据来讲, 基于探索性的数据分析方法设计的投影算子在鲁棒性与适应性



(a) SCR_{in} 与 SCR_{out} 的关系

(a) Relationship between SCR_{in} and SCR_{out}



(b) SCR_{in} 与 ISCR 的关系

(b) Relationship between SCR_{in} and ISCR

图 4 不同 SCR_{in} 的实验结果曲线

Fig. 4 Experimental curves of different SCR_{in}

方面往往优于基于传统统计学的假设检验方法设计的投影算子。

在图像序列中随机选取 16 组图像,每组图像的帧数从 4 依次增加到 20。投影帧数与 \overline{ISCR} 的实验结果曲线如图 5 所示。

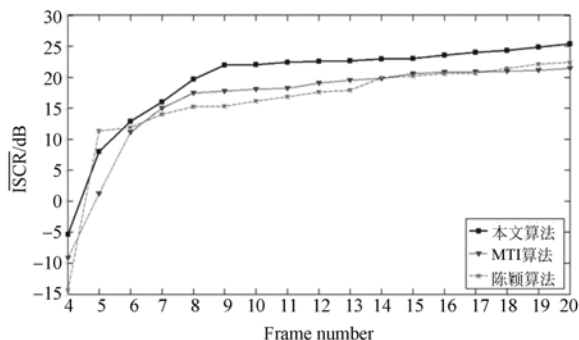


图 5 投影帧数与 \overline{ISCR} 的实验结果曲线

Fig. 5 Experimental curves of frame number and \overline{ISCR}

观察图 5 可知, \overline{ISCR} 随着投影帧数的增加而增大,并且在帧数约为 8 的位置处到达拐点,之后的变化趋势明显趋缓。当投影帧数等于 4 时,不同算法的 \overline{ISCR} 均小于 0 dB,不能达到背景抑制的目的;当投影帧数大于等于 8 时, \overline{ISCR} 基本或者大于 15.0 dB,能够有效地把目标从残差图像中突显出来,便于轨迹检测时阈值门限的选取与目标条痕的确认。

下面用实验方法分析拍摄场景与平台的相对运动对投影算法的影响。在图像序列中依据不同的背景运动速度选取 13 组图像,每组为连续的 8 帧,速度从 0~1.2 pixel/frame 平均分成 13 等份,相对运动速度与平均信杂比增益的实验结果曲线如图 6 所示。

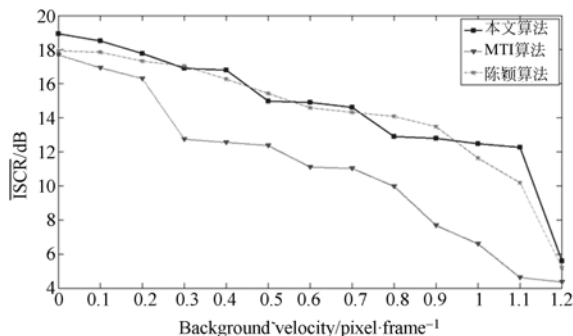


图 6 背景运动速度与 \overline{ISCR} 的实验结果曲线

Fig. 6 Experimental curves of background velocity and \overline{ISCR}

观察图 6 可知, \overline{ISCR} 随着背景运动速度的增大而减小,当相对运动速度从 0 依次变化到 1.2 pixel/frame 时, \overline{ISCR} 从 18.0 dB 左右下降到了 6.0 dB 以下。如果继续增大背景运动速度,投影算法的性能将进一步降低。因此,如果拍摄场景与平台的相对运动较快,需要在投影检测之前进行帧与帧之间的配准。事实上,此时进行帧间配准对于基于任何策略的检测与跟踪系统来讲都是必不可少的。

由于相机载荷平台的高频振动所产生的成像模糊是不可避免的。当模糊比较严重的时候,小目标会完全淹没在背景中主观视觉无法分辨。下面仍旧利用实验方法分析这种模糊对投影算法性能的影响。在图像序列中依据不同的振动量选取 13 组图像,每组为连续的 8 帧。振动量从 0~2.4 pixel 平均分成 13 等份,高频振动量与平均信杂比增益的实验结果曲线如图 7 所示。

观察图 7 可知, $\overline{\text{ISCR}}$ 并不随高频振动量的增加而下降, 这也是投影类算法相比于一般单帧预处理算法所特有的优势。虽然振动量的增加会使成像越来越模糊, 但是对于同一振动量来讲, 这种模糊的程度在时间序列上是相对不变的。只要小目标不是完全的湮没在噪声中, 基于投影策略预处理算法就能够比较有效地抑制背景、突出目标。

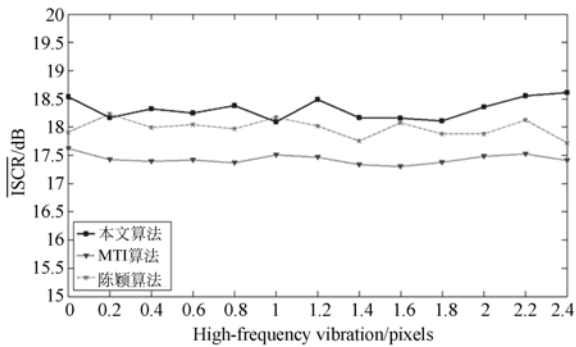


图 7 高频振动量与 $\overline{\text{ISCR}}$ 的实验结果曲线

Fig. 7 Experimental curves of high-frequency vibration and $\overline{\text{ISCR}}$

对于以上讨论的 3 种投影算子, 当目标相对于相机焦平面运动的角速度非常缓慢即小于 1.0 pixel/frame 时, 算法性能下降很快, 不能有效地检测出目标来。一般性的解决方法是在对目标运动角速度先验可知的前提下, 通过隔数帧选取一帧的策略来避免这个问题。陈非设计的投影算子由于使用当前帧的背景估计图像进行差分, 原则上能够避免这个问题, 但是算法性能受背景估计结果的影响很大。目前看来, 如何设计投影算子

参考文献:

- [1] 秦翰林, 周慧鑫, 刘群昌, 等. 采用多尺度隐式马尔可夫模型的红外图像背景抑制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1950-1956.
QIN H L, ZHOU H X, LIU Q CH, *et al.*. Suppression of infrared image background by multiscale hidden Markov model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1950-1956. (in Chinese)
- [2] 孟祥龙, 张伟, 丛明煜, 等. 天基红外图像的点目标检测[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 2094-2010.
MENG X L, ZHANG W, CONG M Y, *et al.*. Detection of point targets in space-based infrared image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2094-2010. (in Chinese)
- [3] 曹琦, 王德江, 张齐, 等. 红外点目标检测中的能量

来实现对目标不同运动速度的自适应性一直是投影算法研究的难点之一。

5 结 论

本文利用实验方法比较分析了不同投影算子对云背景杂波的抑制能力。首先, 阐述了投影算子的数学思想与设计方法, 并针对云杂波场景设计了基于探索性数据分析的时序差分标准化最大值投影算子。其次, 利用航天相机 MODIS 实拍的红外图像、结合实验室仿真手段建立了序列图像数据库, 并测试了不同条件下算法的性能差异。本文采用 ISCR 与 $\overline{\text{ISCR}}$ 作为评价指标, 实验结果表明投影算法在弱小目标探测与抑制云层边缘部分均具有显著的优势, 并且能够有效地抑制平台高频振动带来的图像模糊。但是其性能受拍摄场景与平台的相对运动速度及投影帧数的影响较大: 如果运动速度大于 1.2 pixel/frame 时, $\overline{\text{ISCR}}$ 下降到 10.0 dB 以下, 在投影检测之前需要进行帧间配准; 当投影帧数小于 7 时, $\overline{\text{ISCR}}$ 下降到 15.0 dB 以下, 不利于门限阈值分割与目标轨迹确认算法的设计与实现。

对比本文算法与另外 2 种算法输出信杂比的实验结果表明, 对于小样本的数据分析, 基于次序统计的非参数化方法在适应性方面往往优于传统假设检验的方法。另外, 在投影策略的研究方面, 如何设计出能够适应小目标不同运动速度的投影算子仍然值得做深入的研究工作。

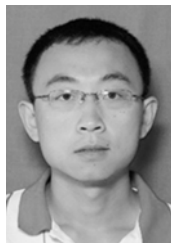
- 积累[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 741-747.
CAO Q, WANG D J, ZHANG Q, *et al.*. Energy accumulation in infrared point target detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 741-747. (in Chinese)
- [4] 王学伟, 王春歆, 张玉叶, 等. 空间小目标动态规划检测[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 477-484.
WANG X W, WANG CH X, ZHANG Y Y, *et al.*. Detection of space target by dynamic programming [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 477-484. (in Chinese)
- [5] REED I S, GAGLIARDI R M, SHAO H M. Application of three-dimensional filtering to moving target detection [J]. *IEEE Trans. on AES.*, 1983, 19(2): 898-905.

- [6] CHU P L. Optimal projection for multidimensional signal detection [J]. *IEEE Trans. on ASSP*, 1988,36(5):775-786.
- [7] CHU P L. Efficient detection of small moving objects [R]. *Lexington, MA: Lincoln Laboratory, MIT*, 1989.
- [8] 陈颖,刘镰斧,李在铭.一种微弱点运动目标的快速统计检测算法[J]. *电子学报*,2001,29(12):1707-1709.
CHEN Y, LIU L F, LI Z M. A fast detection algorithm of dim point moving target using statistical analysis [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001,29(12):1707-1709. (in Chinese)
- [9] 陈非,敬忠良,李建勋.红外序列图像中缓动点目标的投影检测算法及其改进[J]. *红外与毫米波学报*,2003,22(2):96-100.
CHEN F, JING ZH L, LI J X. Improvement to projection detection of slowly moving point target in infrared image sequences [J]. *J. Infrared Millim. Wave*, 2003,22(2):96-100. (in Chinese)
- [10] 孙立辉,周冰,应家驹,等.用高阶累积量投影法检测红外弱小目标[J]. *光电工程*,2008,35(9):6-10.
SUN L H, ZHOU B, YING J J, *et al.*. Detecting infrared dim and small target with high-order cumulant projection [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008,35(9):6-10. (in Chinese)
- [11] ALEXIS P T. *Detection of small targets in infrared image sequences containing evolving cloud clutter* [D]. Boston, MA: Northeastern University, 1998.
- [12] 孙新德,薄树奎,李玲玲.基于背景估计的红外图像杂波背景抑制方法研究[J]. *激光与红外*,2011,41(5):586-590.
SUN X D, BO SH K, LI L L. Study of infrared image clutter suppression based on background estimation [J]. *Laser & Infrared*, 2011,41(5):586-590. (in Chinese)
- [13] 吴爽,刘铮,刘钦.基于数学形态学的红外图像预处理算法分析[J]. *制导与引信*,2010,31(4):20-25.
WU SH, LIU ZH, LIU Q. Study of methods for infrared imaging preprocessing based on mathematical morphology [J]. *Guidance & Fuze*, 2010,31(4):20-25. (in Chinese)
- [14] 张毅刚,曹阳,项学智.基于形态学 Top-hat 滤波的红外小目标检测[J]. *计算机测量与控制*,2011,19(6):1269-1272.
ZHANG Y G, CAO Y, XIANG X ZH. IR small target detection based on morphological Top-hat filter [J]. *Computer Measurement & Control*, 2011,19(6):1269-1271. (in Chinese)
- [15] 杨效余,张天序.一种基于复杂地物背景图像的目标识别方法[J]. *系统工程与电子技术*,2011,33(1):13-16.
YANG X S, ZHANG T X. Method of target recognition from images based on complex natural scenes [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011,33(1):13-16. (in Chinese)
- [16] 陈忠铤,郭德媛.探索性数据分析[M].北京:中国统计出版社,1998.
CHEN ZH L, GUO D Y. *Understanding Robust and Exploratory Data Analysis* [M]. Beijing: China Statistics Press, 1998. (in Chinese)

作者简介:



何文家(1985—),男,辽宁葫芦岛人,硕士研究生,61815部队研究实习员,2008年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事空间目标监视与仿真方面的研究。E-mail: andyhe06@126.com



鲍文卓(1983—),男,内蒙古兴安盟人,博士研究生,2004年、2007年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间目标特性与图像仿真方面的研究。E-mail: latermouse@126.com



张寅(1986—),男,江苏镇江人,博士研究生,2009年于吉林大学获得学士学位,2011年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事空间目标特性与战略场景仿真方面的研究。E-mail: 88240023@sina.com



王刚(1987—),男,河北衡水人,硕士研究生,2010年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事红外相机波前编码与光学成像仿真方面的研究。E-mail: wanggang811@163.com

导师简介:



丛明煜(1964—),男,黑龙江双鸭山人,教授,博士生导师,2001年于哈尔滨工业大学获得工学博士学位,主要从事空间监视、计算机仿真技术方面的研究。E-mail: mycong@hit.edu.cn

● 下期预告

月基望远镜探测能力的地面标定

徐亮,赵建科,薛勋,刘峰,胡丹丹

(中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西西安710119)

针对月基望远镜(LOT)探测能力的验证问题,在地面采用模拟试验对其星等探测信噪比及弥散斑能量集中度进行了测试。该信噪比测试方法不再从分析 CCD 内各项参数对噪声的影响入手,而是采用了一种直接通过图像信息来计算星点目标信噪比的测试方法,该方法能更客观、直接地反应星等信噪比,其目标信噪比测试不确定度可优于 8%;在弥散斑能量集中度测试方法中,通过质心算法求其弥散斑能量中心,进而提出了一种星点弥散斑高斯拟合的方法来拟合弥散斑能量分布曲线,这种高斯拟合的方法大大提高了弥散斑能量集中度的测试精度,可使其测试精度提高 10%。最后通过试验,对 LOT 相机星等探测信噪比及弥散斑能量集中度进行测试,验证了 LOT 相机+15Mv 的探测能力。