基于二维频域投影的弱小运动目标检测方法

逄晓光[1],林 喆[1,2],陈松林[1]

(1. 哈尔滨工业大学 控制与仿真中心,黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 北京空间机电研究所,北京 100190)

摘 要: 针对光学成像弱小运动目标难以准确快速检测问题,提出了基于图像序列行列最大投影的二维频域运动小目标检测算法。首先,为了减少计算复杂度和使目标背景分离,将经过背景全局运动补偿后的视频向二维频域投影并去除频率为零的成分,从而获得含弱小运动目标和噪声的图像序列;其次,通过行列序列最大投影,得到信噪比提高的含弱小运动目标的行列图像;然后,通过主运动滤波和图像重构,检测到滤除配准误差和噪声的弱小运动目标;最后,针对强噪声干扰下的弱小运动目标检测问题进行了仿真实验,仿真结果表明,所提算法不仅可有效的检测出弱小运动目标,而且相对单一的行列分解图像在二维频域内有更高的检测信噪比。

关键词: 弱小运动目标检测; 二维频域投影; 成像制导

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3447-06

Dim moving object detection based on projection into the 2D frequency domain

Di Xiaoguang[1], Lin Zhe[1,2], Chen Songlin[1]

(1. Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;
2. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100190, China)

Abstract: For the dim optical object difficult to fast and accurate detection, a novel algorithm based on the row and column maximum projection of image sequences into the 2D frequency domain was proposed. Firstly, in order to reduce the computation complexity and separate the moving object from the background, through projecting into the 2D frequency domain and removing the zero frequency components, the input video with global background motion compensation was transformed into image sequences comprising of dim small moving object and noise. Secondly, after the row and column maximum projection, the higher signal-to-noise ratio image sequences with dim moving target was obtained. Thirdly, through the principal motion filtering and image reconstruction, the dim moving object was detected. Finally, the proposed algorithm was applied to the dim moving object detection in the strong background noise. The simulation experiment results show the proposed algorithm can not only effectively detect the dim moving object but also have good signal-to-noise ratio of detection.

Key words: dim moving object detection; projection into the 2D frequency domain; imaging guidance

收稿日期: 2013-04-13; **修订日期:** 2013-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(61174202);航天科技创新基金(YY2011009);中央高校基本科研业务费专项资金(HIT.NSRIF.201163)

作者简介: 逄晓光(1972-),男,副教授,博士,主要从事成像制导和飞行控制方面的研究。Email:dixiaoguang@hit.edu.cn

0 引 言

光学成像弱小运动目标检测是光学预警系统、导弹精确制导系统、光学遥感系统等远距离目标监视、跟踪和精确打击系统的核心技术，弱小目标检测算法的精度和有效性直接决定上述系统能否有效的及早发现目标进而做出快速及时的反应。由于弱小目标本身的灰度、形状、纹理和结构特征不明显，对它的检测依然是具有挑战性的技术难题[1-2]。目前运动弱小目标检测技术主要采用基于单帧图像的空域滤波算法[3-4]、多帧能量累积的方法[5-6]，基序列图像先进行空域滤波再进行时域多帧累积的时空域结合的方法[7]。对于前者，当背景复杂时将无法对目标进行有效检测；对于后两者当目标运动过快将出现多帧累积失效的问题[8]。参考文献[9]提出了一种基于目标点与背景云层的时域响应差异，先对序列图像进行时域滤波再进行空域增强的时空域联合滤波方法，但是该方法对于复杂背景下存在与目标点时域响应相似的背景点，将无法有效完成弱小目标的检测。上述这些方法的共同问题是没有充分利用目标的运动信息及其在频域特性与背景的差异特征来进行目标检测。而采用传统的三维频域滤波器设计弱小目标检测则系统维数高、涉及的参数多，难以实现[10]。针对上述方法存在的问题，文中在参考文献[11]所提的二维时频域面状运动目标检测算法的基础上，给出基于图像序列行列最大投影的用于弱小运动目标的检测算法，仿真试验表明该方法在减少计算量的同时，能在复杂干扰环境下准确可靠的检测目标。

1 运动图像序列的频域描述

将傅立叶变换引入运动图像序列所处的 $x-y-t$ 空间后，一个很大的好处就是可以在其对应的频率域 $u-v-w$ 空间内来对运动进行分析，从而使得运动目标、相对静止背景和噪声可更好的区分。

1.1 三维时空频域谱

考虑图像以一个常值速度沿着固定的方向运动，则图像的灰度函数可写为：

$$I(x,y,t)=I(x-r_x t,y-r_y t) \tag{1}$$

式中：x 和 y 是图像水平和垂直方向上的坐标；t 是时间坐标；$I(x,y)$ 为 0 时刻时图像的灰度函数；r_x 和 r_y 分别表示图像水平和垂直方向上的速度。对其进行 3D 傅立叶变换，可得：

$$I_{xyt}^{3rd}(u,v,w)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}I(x,y,t)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}2\pi(xu+yv+tw)}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}t \tag{2}$$

式中：u，v 和 w 分别为空间水平、空间垂直和时间上的频率。将公式(1)代入公式(2)中，可得到移动图像序列的时空频率谱为：

$$I_{xyt}^{3rd}(u,v,w)=I_{xy}^{2rd}(u,v)\delta(w+ur_x+vr_y) \tag{3}$$

式中：$I_{xy}^{2rd}(u,v)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}I(x,y)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}(ux+vy)}\mathrm{d}x\mathrm{d}y$，为初始时刻灰度函数 $I(x,y)$ 的 2D 空间频谱。

从上式可以看出，匀速运动图像的频谱将投影到 3D 频域空间内穿过原点的平面上，该平面的法向方向唯一确定了运动的速度，如图 1 所示。

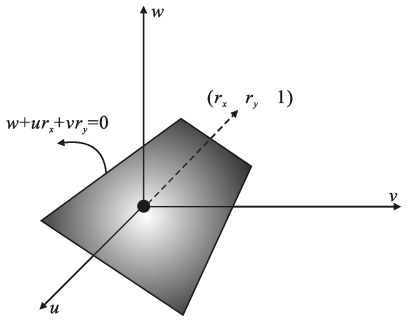


图 1 运动图像的频域描述

Fig.1 Motion image sequence description in frequency domain

1.2 二维时空频域投影[11]

将图像序列分解为行序列和列序列，即分别固定图像序列 $y=i$ 和 $x=j$，可得到：

$$I_r^i(y,t)=I(x,y,t)|_{x=i},\ I_r^j(x,t)=I(x,y,t)|_{y=j} \tag{4}$$

分别对上式进行二维(2D)傅立叶变换，得到

$$I_{yt}^{2rd}(v,w)=I_y^{1rd}(v)\delta(w+vr_y)$$

$$I_{xt}^{2rd}(u,w)=I_x^{1rd}(u)\delta(w+ur_x) \tag{5}$$

式中：$I_y^{1rd}(v)$ 和 $I_x^{1rd}(u)$ 分别为初始时刻图像 $I(x,y)$ 中 i 行和 j 列一维信号的频谱。从公式(5)可知，对于不含有运动行(列)序列，即 $r_x=0(r_y=0)$，灰度信号不随时间发生变化，其谱能量将完全集中于 2D 频域的直流区域($w=0$)。对于存在运动物体在图像中穿过该行(列)时，运动物体的灰度谱能量将投影到 2D 频域空间内一条穿过原点的斜线上。

2 弱小运动目标检测算法

由于小目标的成像面积小，其在单一行或列的频域内所存有的谱能量少，这就造成在低信噪比条件下，难以有效地在运动频域区内对噪声和目标所形成的谱能量进行区分，需针对小目标情况下的运动检测特点，对前文给出的频域投影运动检测算法进行改进。

可考虑将经图像配准进行背景全局运动补偿后的图像序列描述为：

$$I(x,y,k)=B(x,y,k)+T(x,y,k)+n(x,y,k)$$

式中：$B(x,y,k)$、$T(x,y,k)$和 $n(x,y,k)$分别为第 k 帧背景、目标和图像噪声的灰度函数，$n(x,y,k)$满足 $z\sim N(0,\sigma^2)$。在小目标检测条件下，考虑背景图像灰度随时间变化很小，故可将其表示为 $B(x,y,k)=B_s(x,y)$。为了便于分析，假设目标在图像上的投影面积只占一个像元，且在检测时间段内，其灰度值不变为 S，则可将其表示为：

$$T(x,y,k)=S\cdot\delta(x-x_0-r_xk,y-y_0-r_yk) \tag{6}$$

这里(x_0,y_0)和(r_x,r_y)分别为目标在图像中的初始时刻位置和运动速度。由此可将图像的第 i 行分解序列表示为：

$$R_i(x,k)=B_s(x,i)+S\cdot\delta(x-x_0-r_xk,i-y_0-r_yk)+n(x,i,k) \tag{7}$$

式中：$B_s(x,i)$由于与时间无关，其在频域内的谱能量集中于 $w=0$ 附近区域，$n(x,i,k)$为二维时空域中的高斯白噪声，其谱密度为常值 σ^2，根据前文的分析，目标 $S\cdot\delta(x-x_0-r_xk,i-y_0-r_yk)$的谱能量分布于 $ur_x+w+2\pi l=0$ 的一系列平行线上，若考虑在检测时间段内，目标出现在图像序列第 i 行中的帧数为 k_i，则目标在第 i 行二维频域内的平均能量为 k_iS^2/K。此时，可计算二维频域内的信噪比为：

$$SNR_f=\frac{k_iS^2/K}{\sigma^2}=\frac{k_iS^2}{K\sigma^2} \tag{8}$$

由上式可知，通过将行列序列频域内 $w=0$ 的区域内的谱能量置零，虽可实现去除行序列中静止图像的灰度成分，但由于在单一行序列内，信噪比 SNR_f 过低，难以有效实现目标运动谱能量成分的判定和区分。

考虑去除直流谱能量成分后的图像序列由运动目标和噪声组成

$$I_d(x,y,k)=S\cdot\delta(x-x_0-r_xk,y-y_0-r_yk)+n(x,y,k) \tag{9}$$

将其在列方向和行方向进行最大值投影，得到：

$$R_P(x,k)=\max\{I_d(x,i,k)\},i=1,2,\cdots,N_r$$
$$C_P(y,k)=\max\{I_d(j,y,k)\},j=1,2,\cdots,N_c \tag{10}$$

以列方向上投影为例，根据公式(9)，$R_P(x,k)$可进一步描述为：

$$R_P(x,k)=\max\{S\cdot\delta(x-x_0-r_xk,i-y_0-r_yk)+n(x,i,k)\} \tag{11}$$

对于不含有目标的图像列，其投影值为该列 N_r 个随机噪声变量中的最大值，即

$$z_{\max}=\max\{z_i\}\quad i=1,2,\cdots,N_r \tag{12}$$

式中：z_i 为独立同分布的随机变量，其概率密度函数为 $P(z_i)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{z_i^2}{2\sigma^2}}$，则 $z_{\max}$ 的分布函数可表示为：

$$P(z_{\max}<Z|N_r)=\prod_{i=1}^{N_r}\mathrm{p}(z_i<Z)=\left(\frac{1}{2}\mathrm{erf}\left(\frac{Z}{\sqrt{2}\,\sigma}\right)+\frac{1}{2}\right)^{N_r} \tag{13}$$

式中：$\mathrm{erf}(x)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x\mathrm{e}^{-t^2}\mathrm{d}t$ 为误差函数。进一步可计算得到 $z_{\max}$ 的概率密度函数。

$$P(z_{\max}|N_r)=\frac{N_r}{\sigma\sqrt{2\pi}}\left(\frac{1}{2}\mathrm{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{2}\,\sigma}\right)+\frac{1}{2}\right)^{N_r-1}\mathrm{e}^{-\frac{z^2}{2\sigma^2}} \tag{14}$$

对于存在运动目标的列，从公式(13)可计算出目标灰度作为该列中的最大值投影到 $R_P(x,k)$中的概率密度为：

$$P_S(S|N_r)=P(z_{\max}<S|N_r-1)=\left(\frac{1}{2}\mathrm{erf}\left(\frac{S}{\sqrt{2}\,\sigma}\right)+\frac{1}{2}\right)^{N_r-1} \tag{15}$$

从上式可以看出，当目标像元的灰度 S 大于 4σ 时，即可保证目标灰度作为该列中的最大值投影于 $R_P(x,k)$中。

为了方便分析，不妨根据 $z_{\max}$ 的统计分布，使用均值为 A 和方差为$\tilde{\sigma}^2$ 高斯白噪声$\tilde{z}$对其进行逼近，即 $z_{\max}\approx A+\tilde{z}$，则最大值投影图像可近似描述为：

$$R_P(x,k)\approx S\cdot\delta(x-x_0-r_xk)+A+\tilde{z};\tilde{z}\sim N(0,\tilde{\sigma}^2)$$

此时，$R_P(x,k)$在 2D 频域内的信噪比可表示为

$$SNR_p=\frac{k_pS^2}{K\tilde{\sigma}^2} \tag{16}$$

式中：k_p 为目标存在于图像序列中的帧数。

比较公式(8)和(16)，显见 $k_p\geqslant k_i$，且当目标只存在纵向运动时等号成立。此外经最大值投影后，其噪声统计方差将减小，即$\tilde{\sigma}<\sigma$。例如，考虑 8 位灰度级分辨率为 256×256 的图像序列，图像噪声的方差为 262(灰度)的高斯白噪声信号。图 2 给出了纵向最大

值投影后像元灰度的统计曲线，图中 a 曲线给出了 z_{max} 的概率分布函数和概率密度函数，b 曲线则为使用 A=72 的直流信号和 $\tilde{\sigma}$=10（灰度）噪声信号对 z_{max} 的逼近结果。可以看出，通过最大值投影，噪声信号的方差从 262 减少到 102。正是由于 $k_p \geqslant k_i$，$\tilde{\sigma}<\sigma$，投影图像 $R_P(x,k)$ 在二维频域内的信噪比得以提高，进而经过滤波可提取投影图像中的目标谱能量，得到 $\bar{R}_P(x,k)$ 和 $\bar{C}_P(y,k)$。

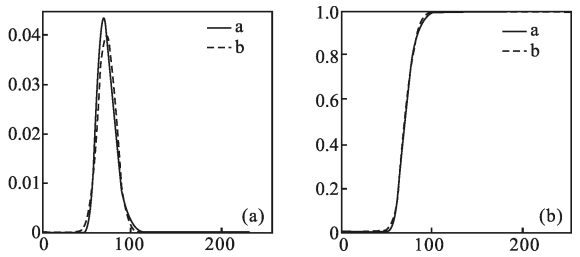


图 2 对 z_{max} 的概率密度函数(a)和(b)概率分布函数逼近曲线

Fig.2 Approximation curves of z_{max} probability density function (a) and (b) distribution function

$\bar{R}_P(x,k)$ 和 $\bar{C}_P(y,k)$ 分别在运动目标所处的列和行位置上保留较大幅值，故应用 $\bar{R}_P(x,k)$ 和 $\bar{C}_P(y,k)$ 作为 $I_d(x,y,k)$ 对应列和行的放大增益，重构检测图像序列

$$\bar{I}_d(x,y,k)=I_d(x,y,k)\times\bar{R}_P(x,k)+I_d(x,y,k)\times\bar{C}_P(y,k) \quad (17)$$

图 3 给出了小目标运动检测的算法流程。对于合并后的输出序列 $\bar{I}_d(x,y,k)$，目标所对应的像元灰度分别经过行列方向上的两次放大，其信号强度从 S 增加为 $2S^2$，而目标所在行和列的噪声信号强度小于 $z\times S$，其他位置的噪声信号更得到有效衰减，故可进一步应用二值化处理方法，去除 $\bar{I}_d(x,y,k)$ 中灰度强度弱的噪声信号得到检测输出图像序列 $\bar{I}_d(x,y,k)$。主运动滤波模块的作用是去除由于图像配准误差导致背景全局运动不能彻底补偿的残余运动分量以及噪声所形成的运动能量，详细的设计方法见参考文献[11]。

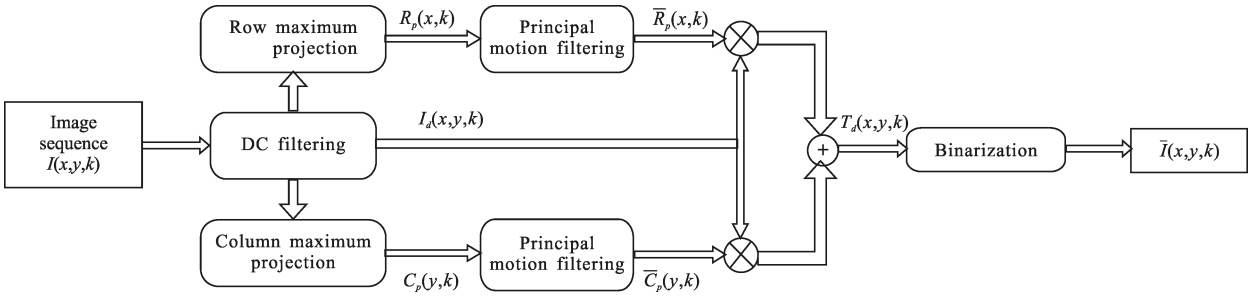


图 3 弱小运动目标检测流程

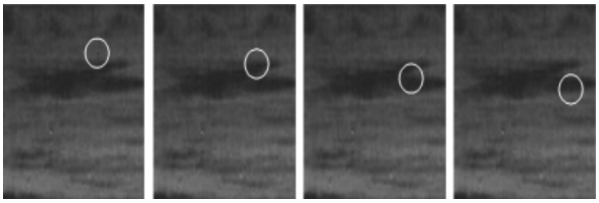
Fig.3 Schematic diagram of dim small object motion detection

3 仿真分析

采用 8 位灰度级 100 帧 256×256 的图像序列进行仿真，小目标的面积为单位像元，其灰度强度在图像序列中保持 180 不变。在图 4 中，(a)和(b)分别给出图像中混入方差为 262 的白噪声信号前后的图像序列，图中圆圈中的亮点为运动的小目标，可以看出在(b)中目标完全淹没于噪声中。经去除图像序列中的直流成分后(见图 4(c))，图像序列中的静态成分得以滤除，而谱能量位于运动频域区内的目标和噪声则保留于 $I_d(x,y,k)$ 中。在 $I_d(x,y,k)$ 的行列最大值投影 $R_P(x,k)$ 和 $C_P(y,k)$ 中(见图 5)，目标像素由于其运动所具有的规律性，分布于直线上。考虑到目标成像面积小，对 $R_P(x,k)$ 和 $C_P(y,k)$ 使用较高的剪切参数 δ_T=0.7 完成主运动滤波，有效地从频域内去除噪声的谱能量成分，使目标的投影轨迹较好的保留在 $\bar{R}_P(x,k)$ 和 $\bar{C}_P(y,k)$ 中。

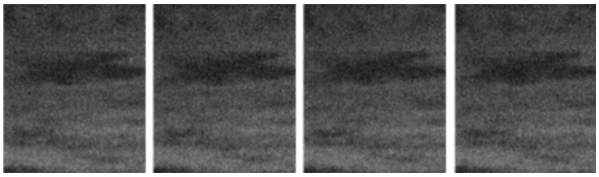
$\bar{R}_P(x,k)$ 和 $\bar{C}_P(y,k)$ 只是检测出三维图像序列在两个二维空间内的投影轨迹，需要应用公式(17)将检测结果重新映射到三维图像序列中。图 6 给出了仿真中第 65 帧输出结果的重构过程。通过应用 $\bar{R}_P(x,65)$ 和 $\bar{C}_P(y,65)$ 对 $I_d(x,y,65)$ 的两次放大，进一步突出了 $\bar{I}_d(x,y,65)$ 中目标的强度，进而通过简单的二值化处理，得到检测输出结果。图 7 给出了在图像噪声强度

$\sigma^2=26^2$ 情况下，应用剪切参数 $\delta_T=0.7$ 从图像序列中检测出两个小目标的检测结果。



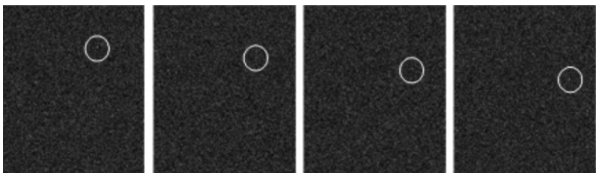
(a) 原始待检测图像序列

(a) Original image sequences to be detected



(b) 混入噪声后的待检测图像序列

(b) Image sequences with noise



(c) 去掉直流频率成分后的输出图像序列

(c) Output of image sequences with removing DC component

图 4　图像序列去直流频率成分后输出结果

Fig.4 Output results of image sequences with DC filtered

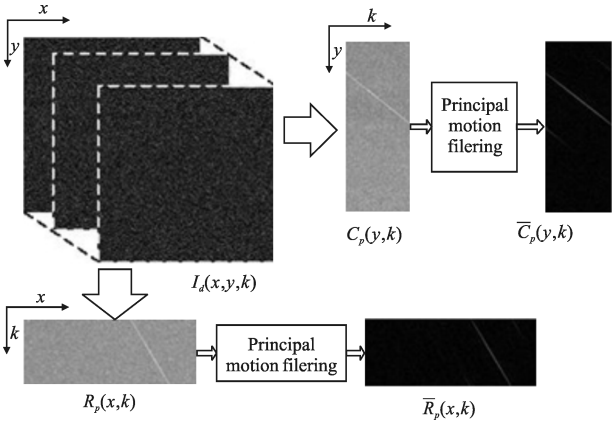


图 5 图像序列的最大值投影与主运动滤波

Fig.5 Maximum value projection and principal motion filter

由前述小目标运动检测算法原理描述与仿真实验结果可知，最大值投影图像比单一的行列分解图像在二维频域内具有更高的检测信噪比，可有效地应用主运动滤波分离出投影图像中目标的运动轨迹，但其检测结果不能直接与目标在三维图像序列中的位置相对应，需通过增加图像序列的重构过程完成小目标的运动检测。

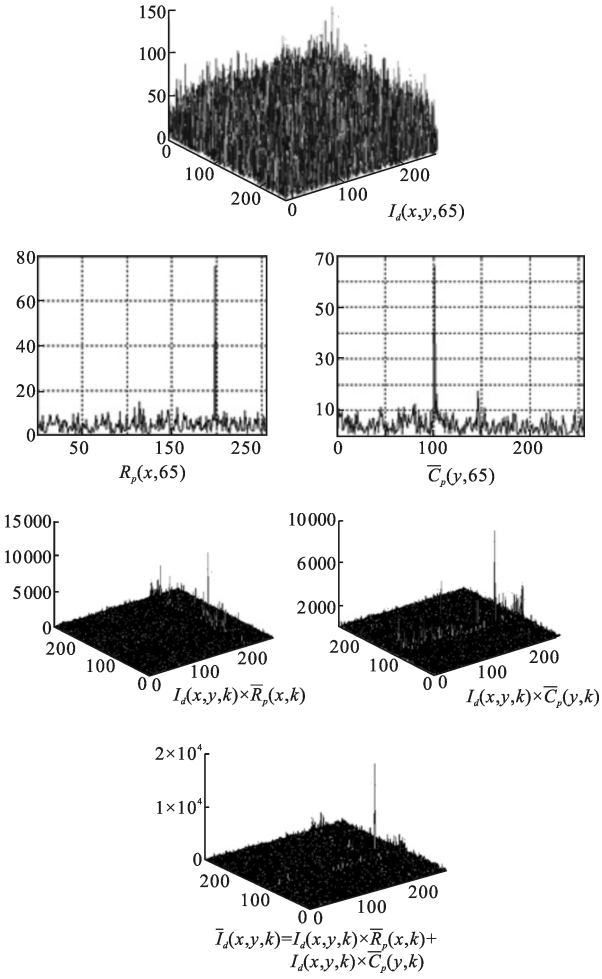


图 6 第 65 帧图像检测结果的重构

Fig.6 The 65th reconstructed process with motion detection algorithm

图 7 弱小目标的运动检测结果

Fig.7 Detection results of dim moving objects

需要说明的是，文中所提出的运动弱小目标检测方法应用前提是输入图像序列已经过图像配准完成了背景全局运动补偿。这样对于如捷联成像导引

头这类由于成像载体运动导致背景图像存在较剧烈全局变化情况下的运动小目标检测问题，文中方法也是有效的。原因是经过图像配准后，残留的背景全局运动能量主要集中于 $w=0$ 附近区域，经过前文所述的主运动滤波模块的处理以及后续的二值化处理后，这些剩余背景运动可以很好的去除掉，进而可完成弱小运动目标的检测任务。

4 结 论

文中所提出的基于图像序列行列最大投影的二维频域运动弱小目标检测算法，相对于传统三维时空频域内的运动能量提取方法而言，通过降低信号处理维数，降低了滤波器的设计难度。同时该方法减少了对背景和目标先验信息的依赖程度，只需要得到图像序列的信噪水平，即可有效实现弱小运动目标与背景的分离，提高了弱小目标的检测率。

参考文献：

[1] Li Xin, Zhao Yigong, Chen Bing, et al. Approach to dim and small target detection based on fuzzy classification[J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2009, 17(9): 2311-2319. (in Chinese)
李欣, 赵亦工, 陈冰, 等. 基于模糊分类的弱小目标检测法[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(9): 2311-2319.

[2] Zeng Wenjing, Wan Lei, Zhang Tiedong, et al. Fast detection of weak targets in complex sea-sky background [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2012, 20 (2): 403 -411. (in Chinese)
曾文静, 万磊, 张铁栋, 等. 复杂海空背景下弱小目标的快速自动检测[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(2): 403-411.

[3] Yang Jie, Yang Lei. Small target detection algorithm based on infrared background complex degree description [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2007, 36(3): 382-386. (in Chinese)
杨杰, 杨磊. 基于红外背景复杂度描述的小目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 382-386.

[4] Li Hong, Wei Yantao, Li Luoqing. Infrared moving target detection and tracking based on tensor locality preserving projection***[J]. Infrared Physics & Technology***, 2010, 53(2): 77-83.

[5] Cao Qi, Wang Dejiang, Zhangqi. Energy accumulation in infrared point target detection [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2010, 18(3): 741-747. (in Chinese)
曹琦, 王德江, 张齐. 红外点目标检测中的能量累积[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(3): 741-747.

[6] Zhang Luping, Li Biao, Wang Luping. Dim target detection method under complex spatial background [J]. ***Infrared and Laser engineering***, 2011, 40(10): 2048-2053. (in Chinese)
张路平, 李飚, 王鲁平, 复杂空间背景下的弱小目标检测方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 2048-2053.

[7] Wang Z C, Gao C Q, Tian J W, et al. Multifeature distance map based fusion detection of small infrared targets with low contrast in image sequences [C]//SPIE, 2005, 5985: 59853-59855.

[8] Gao Chenqiang, Tian Jinwen, Wang Peng. Detection algorithm for infrared moving small target based on temporal domain characteristics analysis [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 37(5): 907-911. (in Chinese)
高陈强, 田金文, 王鹏. 基于时域特性分析的红外运动小目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 907-911.

[9] Zhang Yuan, Xin Yunhong, Zhang Chunqin. An algorithm based on temporal and spatial filters for infrared weak slow moving point target detection [J]. ***Acta Photonica Sinica***, 2010, 39(11): 2049-2054. (in Chinese)
张媛, 辛云宏, 张春琴. 基于时空联合滤波技术的缓慢运动红外弱小目标检测算法 [J]. 光子学报, 2010, 39(11): 2049-2054.

[10] Shinmura H, Hiraoka K, Hamada N. Optimal filter in the frequency-time mixed domain to extract moving object[C]// Proceedings of SPIE, Application of Digital Image Processing XXIII, 2000, 4115: 302-310.

[11] Lin Zhe, Yao Yu, Di Xiaoguang. Moving target detection algorithm in 2D frequency domain [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 36(1): 135-138. (in Chinese)
林喆, 姚郁, 逄晓光. 二维频域内的运动目标检测方法[J]. 红外与激光工程, 2008, 36(1): 135-138.