

复杂天空背景下的红外弱小目标检测算法研究

王笛*, 沈涛

火箭军工程大学核工程学院, 陕西 西安 710025

摘要 为了提高单帧红外图像的检测概率, 稳定检测到图像序列中的弱小目标, 基于改进的双边滤波与多项式拟合, 提出了一种复杂天空背景下的红外弱小目标检测算法。在传统双边滤波算法的权值系数中引入背景相关度因子, 有效降低了背景抑制时目标点的影响, 提高了目标区域的信噪比以及单帧图像的检测率。为了进一步剔除虚假目标, 基于融合目标运动特征, 对目标点进行多帧确认。针对序列检测中目标闪烁造成的目标漏检, 引入多项式拟合算法对下一帧目标位置进行预测, 有效避免了目标轨迹截断的问题。实验结果表明, 在信噪比小于 2 的情况下, 该算法能够稳定检测到复杂天空背景下的弱小目标轨迹。

关键词 测量; 双边滤波; 背景相关度因子; 多帧确认; 多项式拟合

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0512001

Research on Weak and Small Infrared Target Detection Algorithm Under Complex Sky Background

Wang Di*, Shen Tao

College of Nuclear Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025, China

Abstract In order to improve the detection probability of a single-frame infrared image and stably detect weak and small targets in image sequences, a weak and small infrared target detection algorithm under complex sky background is proposed based on the improved bilateral filtering and polynomial fitting. The background correlation factor is introduced into the weight coefficient of the traditional bilateral filtering algorithm to effectively reduce the influence of the target point during background suppression, improve the signal-to-noise ratio of the target area and the detection rate of the single frame image. In order to further eliminate the false target, the motion features of the fusion targets are combined to perform multi-frame confirmation on the target point. Aiming at the target miss detection caused by target flicker in sequence detection, the polynomial fitting algorithm is introduced to predict the target position of the next frame, which effectively avoids the problem of truncation of the target trajectory. The experimental results show that the algorithm can stably detect weak and small target trajectories under complex sky backgrounds when the signal-to-noise ratio is less than 2.

Key words measurement; bilateral filtering; background correlation factor; multi-frame confirmation; polynomial fitting

OCIS codes 120.1880; 330.7326; 110.2970

1 引 言

红外弱小目标检测技术是增加红外预警系统探测距离的关键技术之一, 对于及时发现各种空中机动目标(如飞机、导弹等)具有重要作用。通常当信噪比小于 3 且目标尺寸小于 80 pixel 时, 可以认为是弱小目标, 此时目标成像面积小, 信噪比低, 无明显的结构与纹理特征, 难以进行有效检测^[1-2]。特别是在不断变化的云层背景以及低空城市背景下, 遮

挡或其他因素的干扰可能造成目标某一帧红外图像的丢失, 对目标检测造成了极大的困难。因此, 研究复杂背景条件下的红外弱小目标检测在军事领域具有重要意义^[3]。

红外弱小目标检测算法主要由背景抑制算法与序列检测算法两部分组成^[4], 其中背景抑制算法的核心是背景预测算法。传统的背景预测算法有数学形态学滤波、固定权值滤波、中值滤波、双边滤波等^[5-6]。数学形态学滤波的效果依赖于结构元素的

收稿日期: 2019-09-23; 修回日期: 2019-10-29; 录用日期: 2019-11-09

* E-mail: 1312703428@qq.com

选取,在没有先验知识的情况下难以找到合适的结构元素;固定权值滤波的模板系数往往因为红外图像背景的改变而需要重新确定,适应性不强;中值滤波难以预测图像中的边缘细节等信息;双边滤波算法对于复杂背景的边缘预测有着较好的效果,但是可能造成目标的漏检。在序列检测算法方面,动态规划算法、高阶相关算法、粒子滤波、管道滤波等都较为成熟^[7-8],但是对于复杂背景条件下目标点偶然丢失的问题研究较少。目前常用的主要是基于卡尔曼滤波的序列检测算法^[9-10],其局限性主要在于目标运动模型的确定,简单的线性运动模型难以准确预测机动变轨能力较强的运动目标,而复杂的高阶模型参数多,计算量大,实时性差。

为了适应复杂的天空背景以及目标的高机动性,降低目标检测算法的漏检率,增强算法的鲁棒性,本文提出一种基于改进的双边滤波与多项式拟合预测的红外弱小目标检测算法。首先,利用改进的双边滤波算法对单帧图像进行背景预测,得到包含目标以及噪点的残差图像;然后根据序列图像的帧间相关性,结合目标的运动特征去除高频噪点并形成初始轨迹^[8]。对于目标丢失的情况,利用多项式拟合算法预测目标在下一帧中的位置,保证对目标轨迹的稳定检测。

2 背景抑制算法

背景抑制技术是决定目标检测算法性能的关键技术之一。利用目标与背景特征的不相关特性,可以实现对红外弱小目标的有效检测。一帧红外图像可以分解为三部分的线性叠加^[11],即

$$f(x, y) = f_t(x, y) + f_b(x, y) + n(x, y), \quad (1)$$

式中: (x, y) 为像素坐标; $f_t(x, y)$ 为红外弱小目标的灰度值; $f_b(x, y)$ 为背景灰度值; $n(x, y)$ 为噪声灰度值。假设 $\hat{f}(x, y)$ 表示对红外图像中某一像素点灰度值的预测值,则经过背景抑制得到的残差图像为 $e(x, y) = f(x, y) - \hat{f}(x, y)$ 。

2.1 双边滤波原理

双边滤波是一种非线性滤波器,结合图像空间

邻近度以及像素值相似度进行折中处理,它可以在平滑降噪的同时尽可能保持图像边缘^[12]。双边滤波采用加权平均的方法,其权重不仅考虑了像素空间域的欧氏距离,还考虑了像素范围域内的灰度值差异。假设 (i, j) 为中心像素的坐标, (p, q) 为一邻域像素的坐标, $g(i, j)$ 为中心像素的灰度预测值,则

$$g(i, j) = \frac{\sum_{p, q} f(p, q)w(i, j, p, q)}{\sum_{p, q} w(i, j, p, q)}, \quad (2)$$

式中: $f(p, q)$ 为邻域像素的灰度值;加权系数 $w(i, j, p, q)$ 为空间域核与像素范围域核的综合结果。空间域核表达式为

$$d(i, j, p, q) = \exp\left[-\frac{(i-p)^2 + (j-q)^2}{2\sigma_d^2}\right], \quad (3)$$

像素范围域核的表达式为

$$r(i, j, p, q) = \exp\left[-\frac{\|f(i, j) - f(p, q)\|^2}{2\sigma_r^2}\right], \quad (4)$$

式中: σ_d, σ_r 分别为空间域核与像素范围域核的滤波尺度。

2.2 改进的双边滤波算法

传统的双边滤波算法虽然能够有效地抑制高斯噪声,同时保留图像的边缘细节,但是弱小目标具有点扩散特性,基本符合二维的高斯分布^[13],其中心点邻域范围内的多个像素具有与中心点相近的灰度值,因此在利用双边滤波进行背景预测时,得到的图像不仅包含背景图像,还可能包含目标点,由此得到的残差图像可能造成目标的漏检。为了使双边滤波算法能够在消除噪声的同时有效抑制目标,降低红外弱小目标检测的漏检率,本文提出背景相关度因子对权重进行调节,即

$$c(i, j, p, q) = \exp[-|f(p, q) - B|], \quad (5)$$

式中: B 为局部背景灰度的均值,通常取邻域尺寸3倍的环形区域作为背景进行估计。假设邻域范围是以 (i, j) 为中心,半径为 r 的圆形区域,则背景是半径为 $r \sim 3r$ 的圆环。此时,新的权重系数为

$$w(i, j, p, q) = d(i, j, p, q)r(i, j, p, q)c(i, j, p, q) = \exp\left[-\frac{(i-p)^2 + (j-q)^2}{2\sigma_d^2} - \frac{\|f(i, j) - f(p, q)\|^2}{2\sigma_r^2} - |f(p, q) - B|\right]. \quad (6)$$

从(6)式可以看出,在预测中心像素 (i, j) 的灰度值时,其邻域像素 (p, q) 的灰度与局部背景的平均

均灰度越接近时,背景相关度因子 c 越大,即 (p, q) 所占权重越大;当两者的差值越大时, c 越小,即 (p, q) 的权重变小。当中心像素移动到目标区域时,由于目标灰度值高于背景平均灰度且呈高斯分布,通过计算可知目标区域中心的背景相关度最小,并且向边缘方向逐渐增大,如图 1 所示。此时,通过背景相关度因子的调节,邻域像素的权重较传统双边滤波算法有所降低,目标像素的灰度得到抑制。

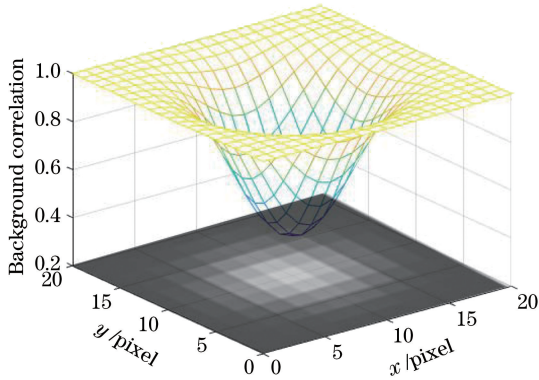


图 1 背景相关度

Fig. 1 Background correlation

3 序列检测算法

经过背景抑制处理得到的单帧红外图像由真实目标以及少量的虚假目标构成,其中虚假目标主要为一些高频噪声,具有随机分布的特性,为了进一步剔除虚假目标,可以利用红外弱小目标在序列图像中的运动特征,实现对目标轨迹的确定。然而,在实际检测过程中,算法性能限制或目标闪烁造成的漏检现象,可能引起轨迹截断或轨迹误关联,因此,本文提出了基于多项式拟合的序列检测算法。首先利用运动目标在图像序列中体现出来的运动特征对目标进行多帧确认,然后利用多项式拟合算法对漏检的弱小目标进行位置预测,最后输出完整的目标轨迹。

3.1 多帧确认方法

弱小目标在红外序列图像中体现出来的运动特征是实现目标检测的关键。在实际红外成像系统中,由于系统的帧频较高,运动目标在相邻两帧中的位置不会有突变,即在时间和空间上具有连续性。如果第 k 帧图像在 (x, y) 处存在弱小目标,那么第 $k+1$ 帧图像中以 (x, y) 为中心的邻域范围内也一定存在弱小目标,而噪声往往是随机分布的,当前帧中出现的噪声在下一帧中的相同位置附近很有可能消失。因此,运动目标在序列图像中存在时空连续性,而随机噪声不具备该特征。利用目标运动的

时空连续性,可以构建短时目标运动轨迹;通过将目标的运动方式简化为直线运动以及转弯运动,以目标的速度特征与方向特征为约束条件,可以对可疑目标进行有效筛选,从而提高目标检测的准确性。

当目标相对于红外成像系统作切向运动时,图像中目标移动速度最快。假设红外成像系统的焦距为 f ,帧频为 u ,目标的实际运动速度为 v ,运动方向垂直于光轴,目标与成像系统之间的距离为 S ,则相邻两帧之间目标移动的最大距离为 l_{\max} ,如图 2 所示。

$$l_{\max} = \frac{f \cdot v / u}{S} \quad (7)$$

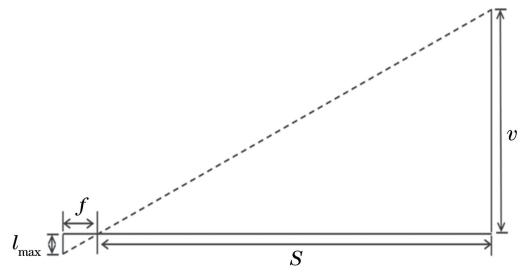


图 2 切向运动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tangential motion

假设第 k 帧中的目标位置为 \mathbf{x}_k ,则相邻两帧间的目标点一定满足条件 $|\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k| \leq l_{\max}$ 。当目标作转弯运动时,目标在连续三帧的位置如图 3 所示,其中 $l_1 = |\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}|$, $l_2 = |\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k|$, $l_3 = |\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_{k-1}|$,则转弯角 φ 为

$$\varphi = \pi - \arccos \frac{l_1^2 + l_2^2 - l_3^2}{2l_1 \cdot l_2} \quad (8)$$

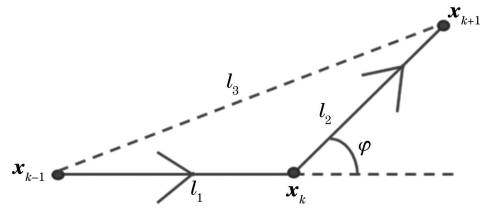


图 3 转弯运动示意图

Fig. 3 Schematic diagram of turning motion

由于高速运动目标在连续三帧内的机动范围有限,因此有 $\varphi \leq \varphi_{\max}$, φ_{\max} 为目标的最大转弯角,本文设为 $\pi/2$ 。

将图像中所有的可疑目标点定义为候选目标点,当相邻帧中的候选目标点同时满足距离门限与方向门限时,则将两个候选目标点进行关联,对每一帧图像的每一个候选目标点进行运动特征匹配,以得到目标运动轨迹。

在实际检测过程中,往往会产生多条目标轨迹,其中虚假轨迹包含随机分布的高频噪声而关联点数

少,但目标具有时空连续性,因此关联候选目标点数最多的轨迹为真实轨迹。假设目标轨迹的长度为 n , 已检测的图像帧数为 K , 可以将轨迹长度与图像帧数的比值定义为轨迹可信度 F , 即

$$F = \frac{n}{K} \times 100\%。 \quad (9)$$

F 越大, 则越有可能是真实的目标轨迹, 由于存在多个运动目标的情况, 可以根据实际需要, 选择一条或多条目标轨迹进行分析。

3.2 目标点预测

在多帧确认过程中, 如果某一帧图像出现了目标漏检现象, 即当前帧中不存在真实的弱小目标, 那么就有可能造成目标轨迹截断或轨迹误关联, 使得真实目标轨迹的轨迹可信度降低或者输出错误的目标轨迹。为了增强多帧确认过程的鲁棒性, 采用多项式拟合的方法对缺失的目标位置进行预测, 可以有效提高目标检测的准确性。

多项式拟合是一种基于最小二乘理论的函数估计方法, 它通过使误差平方和最小的方法寻找与当前数据匹配的最佳函数。

背景遮挡或目标在大气传播过程发生闪烁, 容易造成红外序列图像中目标丢失, 此时可以对前 n 帧图像的目标轨迹进行多项式拟合, 从而对下一帧图像中的目标位置进行预测, 避免轨迹检测中断。为了减小序列检测的运算量, 将连续三帧无关联候选目标点的轨迹删除。如图 4 所示, 红外图像序列检测算法的具体流程如下。

1) 输入待检测的红外图像序列, 读取第一帧图像。对图像进行单帧背景抑制, 此时的图像由真实目标以及少量虚假目标组成。阈值分割并二值化, 标记候选目标的中心点, 作为轨迹起始点。

2) 读取第二帧图像, 按照步骤 1) 标记候选目标点。计算连续两帧之间所有目标点的距离 l , 当 $l \leq l_{\max}$ 时, 则生成一条目标轨迹, 否则将此点作为新的轨迹起始点。

3) 读取下一帧图像, 按照步骤 2) 计算当前帧目标点与前一帧目标点之间的距离, 同时计算当前帧目标点与之前运动方向的偏差, 即转弯角 φ 。当同时满足距离门限与方向门限时, 将此点关联到当前目标轨迹中; 当所有目标轨迹与此点均不匹配时, 将此点作为新的轨迹起始点。

4) 重复步骤 3), 当一条轨迹关联的候选目标点数大于 3 时, 对此条轨迹进行标记。在检测过程中, 当标记的目标轨迹与所有候选目标点均失配时, 利

用当前轨迹点进行多项式拟合, 并预测目标在下一帧的位置, 保证对目标轨迹继续检测。

5) 当标记的轨迹连续三帧均丢失目标点时, 则删除此条轨迹。

6) 最后, 计算每条轨迹的可信度 F , 将可信度最大的轨迹作为真实目标轨迹输出。

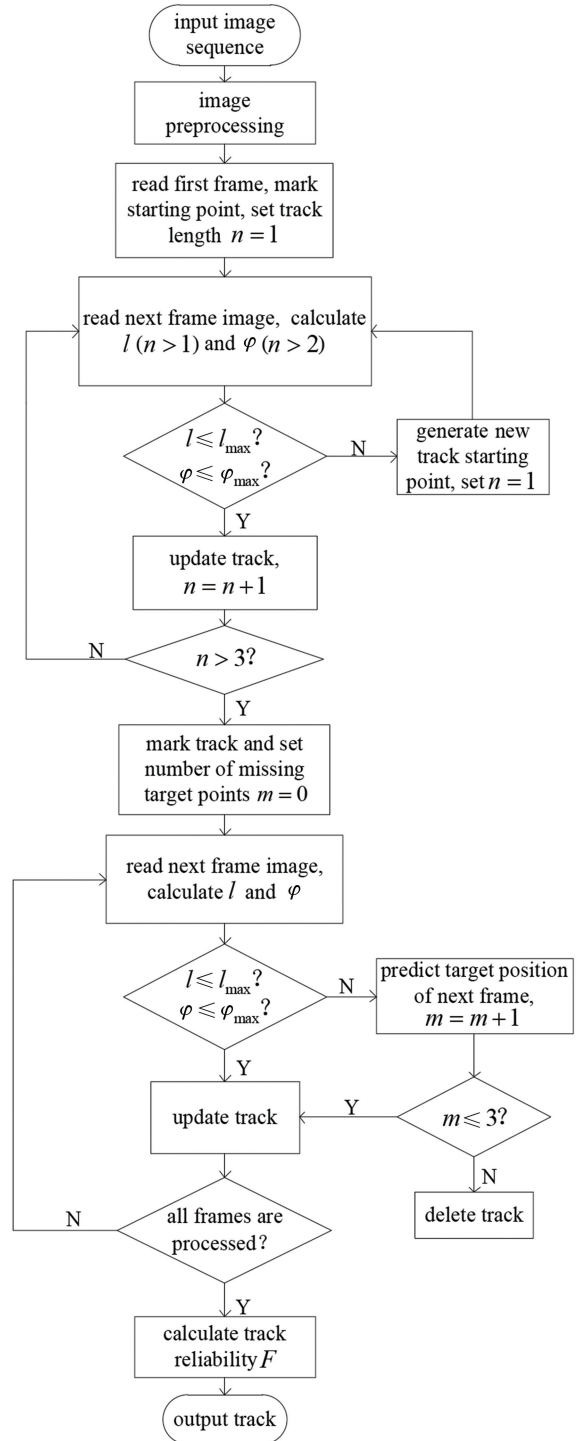


图 4 目标轨迹检测流程图

Fig. 4 Target trajectory detection flow chart

4 实验结果与分析

为了衡量相关算法的检测效果,本文利用 MATLAB 进行仿真实验,采用局部信噪比 R_{SNR} , 信噪比增益 I_{ISNR} , 背景抑制因子 B_{BSF} 作为评价指标, 各个指标定义^[14]如下:

$$R_{\text{SNR}} = \frac{|G_t - G_b|}{\sigma_b}, \quad (10)$$

$$I_{\text{ISNR}} = \frac{R_{\text{out}}^{\text{SNR}}}{R_{\text{in}}^{\text{SNR}}}, \quad (11)$$

$$B_{\text{BSF}} = \frac{\sigma_{\text{in}}}{\sigma_{\text{out}}}, \quad (12)$$

式中: G_t 为 3×3 目标区域的平均灰度值; G_b 为目标周围的 9×9 环形背景区域的平均灰度值; σ_b 为相应环形背景区域的标准差; $R_{\text{out}}^{\text{SNR}}$ 为背景预测残差中的局部信噪比; $R_{\text{in}}^{\text{SNR}}$ 为输入图像中的局部信噪比; σ_{in} 为输入图像中背景区域的标准差; σ_{out} 为背景预测残差中背景区域的标准差。

4.1 实验一

图 5 为三种典型天空背景下本文算法与传统双边滤波算法的背景抑制结果对比图,其中场景一为简单天空背景,场景二为复杂云层背景,场景三为低空城市背景,弱小目标采用高斯点扩散函数由计算机仿真生成,并满足信噪比小于 3 的要求。图 5(a1)~(a3)为三种场景下的红外弱小目标图像,矩形框标记了目标的具体位置,右上角为目标位置开窗放大的示意图。图 5(b1)~(b3)为传统双边滤波算法的背景抑制残差,图 5(c1)~(c3)为本文算法的背景抑制残差,右上角为目标区域的三维网格图。表 1 比较了这两种算法的性能差异,可以看出,尽管两种算法的背景抑制因子大小近似一致,但是本文算法的信噪比增益大约为双边滤波算法信噪比增益的 2 倍。信噪比增益越大,则目标越显著,即更容易被检测出来,因此本文算法能够有效提高背景抑制残差中的目标显著性。

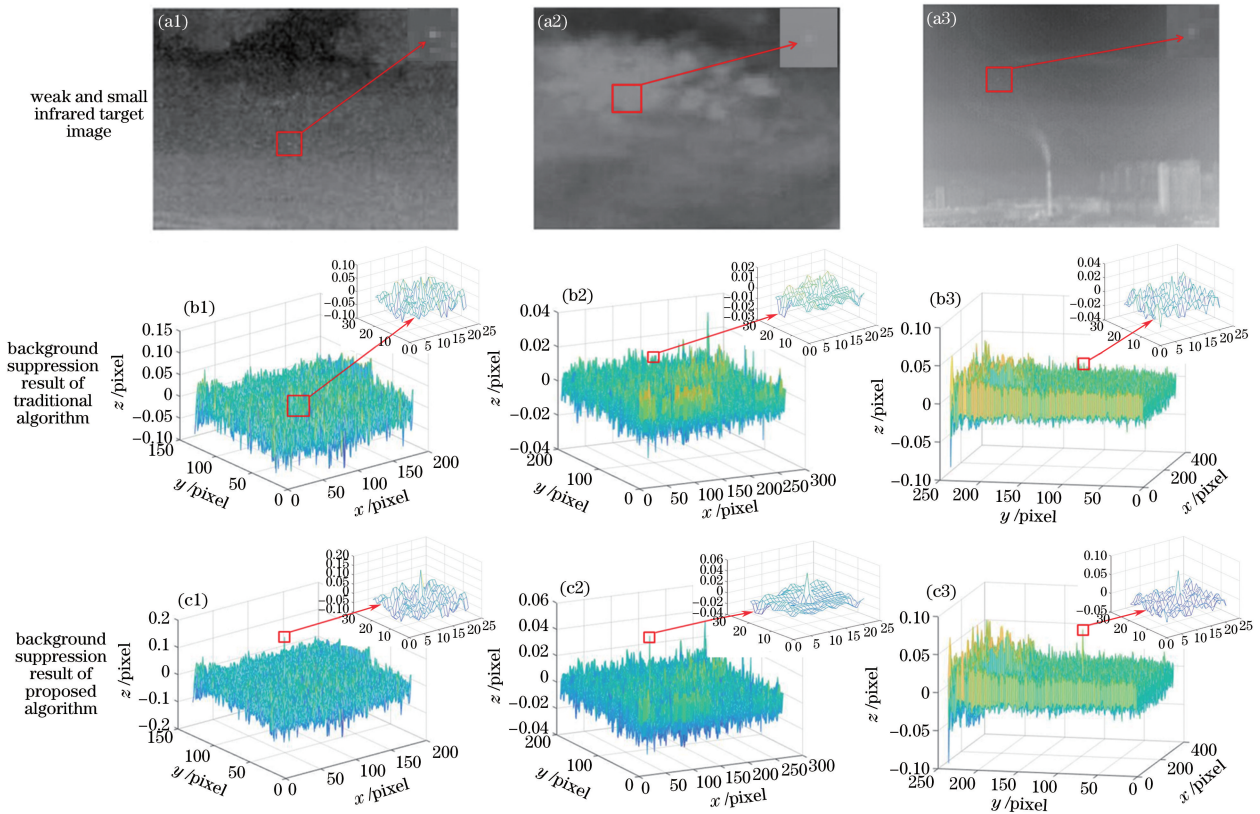


图 5 本文算法与传统双边滤波算法结果对比图。(a1)(b1)(c1)场景一;(a2)(b2)(c2)场景二;(a3)(b3)(c3)场景三

Fig. 5 Result comparison of proposed algorithm and traditional bilateral filtering algorithm. (a1)(b1)(c1) Scene one; (a2)(b2)(c2) scene two; (a3)(b3)(c3) scene three

4.2 实验二

以小型无人机作为弱小目标,以复杂云层作为背景,模拟强杂波环境。采集一组红外视频序列作

为数据源,取其中的 50 帧数据进行目标轨迹检测,图像大小为 512×640 ,目标信噪比均小于 2。根据图 4 中的序列检测算法流程,首先对单帧红外图像

表 1 本文算法与双边滤波算法性能比较

Table 1 Performance comparison between proposed algorithm and bilateral filtering algorithm

Scene	Input image		Proposed algorithm				Traditional bilateral filtering algorithm			
	σ_{in}	R_{in}^{SNR}	σ_{out}	B_{BSF}	R_{out}^{SNR}	I_{ISNR}	σ_{out}	B_{BSF}	R_{out}^{SNR}	I_{ISNR}
Scene one	0.022	1.357	0.019	1.158	8.607	6.343	0.017	1.294	4.849	3.573
Scene two	0.005	2.749	0.003	1.667	15.575	5.666	0.003	1.667	7.667	2.789
Scene three	0.010	2.903	0.008	1.250	10.587	3.647	0.008	1.250	5.218	1.797

进行背景抑制以及目标点分割,得到所有候选目标点。图 6(a1)为第 1 帧红外图像,矩形框标记了目标的具体位置。图 6(a2)为第 27 帧红外图像,通过放大的三维网格图可以看出,第 1 帧中的目标较为明显,计算得到局部信噪比为 1.4835,第 27 帧中的目标基本淹没于背景之中,局部信噪比为 0.7918。图 6(b1)、(b2)为相应的单帧检测结果,可以看出,在强杂波环境下,目标虚警率普遍比较高,候选目标点数较多,需要通过多帧确认方法剔除虚假目标。在第 1 帧中检测到真实目标点,而在第 27 帧中,由于目标经过云层边缘,信噪比大幅下降,未检测到真实目标点,出现了漏检现象,因此需要通过位置预测

来保证目标轨迹的稳定检测。在对 50 帧图像的检测中,第 11 帧、第 27 帧、第 40 帧均没有检测到真实目标。

基于多项式拟合的序列检测结果与基于传统管道滤波算法的检测结果如图 7 所示。可以看出,由于多项式拟合算法准确地预测了三帧漏检目标的位置,因此红外图像序列检测结果的检测率为 100%,检测轨迹与目标真实轨迹一致;而传统的管道滤波算法由于受到漏检目标的影响,目标轨迹截断,因此检测率大幅下降,同时由于虚假目标的干扰,检测结果在第 24 帧、第 25 帧出现了明显的轨迹误关联,整体检测率只有 74%。

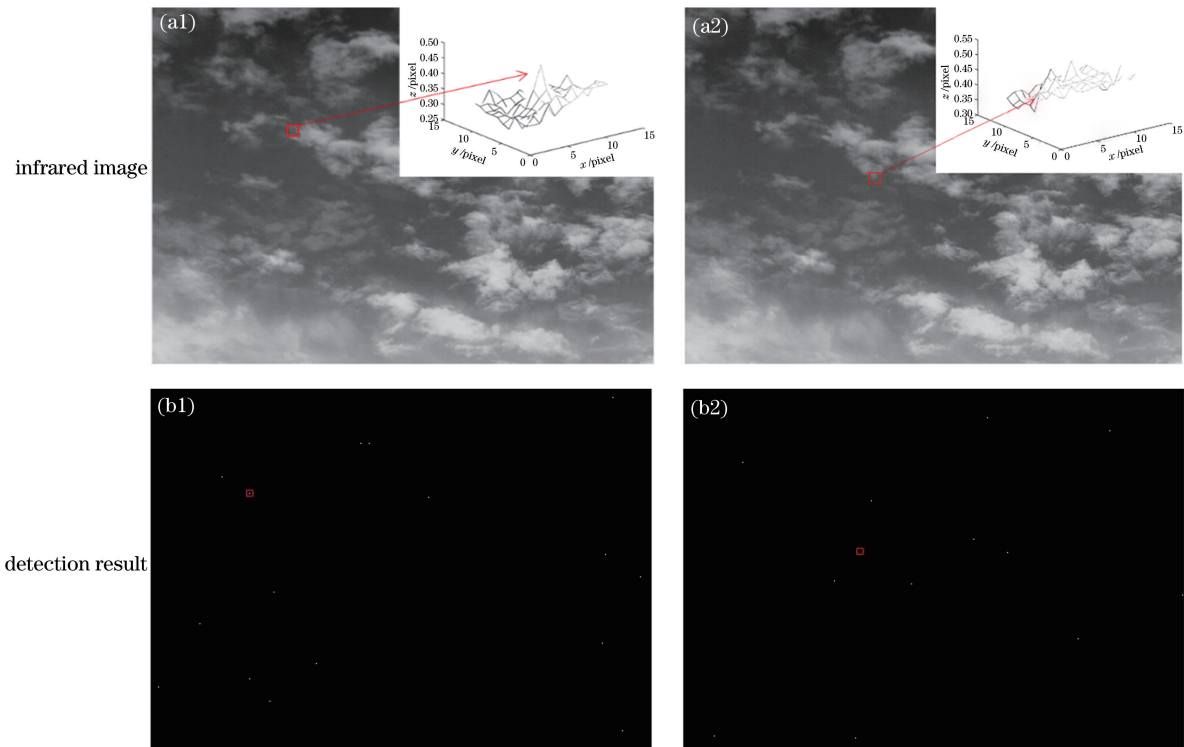


图 6 单帧检测结果。(a1)(b1)第 1 帧;(a2)(b2)第 27 帧

Fig. 6 Single frame detection result. (a1)(b1) Frame 1; (a2)(b2) Frame 27

5 结 论

复杂天空背景下的红外弱小目标检测技术在军

事领域方面具有重要价值。针对双边滤波算法在红外弱小目标检测中出现的漏检现象,通过引入背景相关度因子,对传统算法的权值系数进行修正,提高

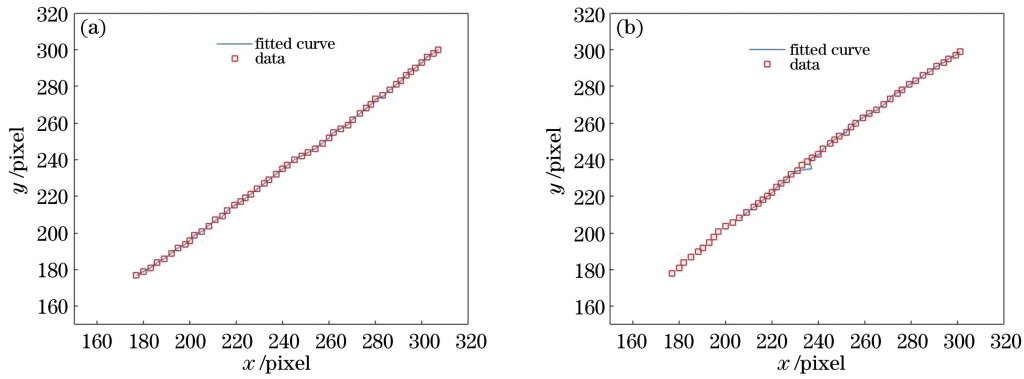


图 7 目标轨迹检测结果对比。(a)基于多项式拟合的序列检测结果;(b)基于管道滤波算法的序列检测结果

Fig. 7 Comparison of target trajectory detection results. (a) Detection result based on polynomial fitting;

(b) detection result based on pipeline filtering algorithm

了目标区域的信噪比增益;在红外图像序列检测中,利用弱小目标的运动特征进行多帧确认,降低了检测虚警率;针对目标漏检造成的轨迹截断,提出利用多项式拟合算法对下一帧目标点的位置进行预测。实验结果证明,所提算法能够稳定检测到复杂天空背景下信噪比小于 2 的弱小目标,有效提高目标检测率。

参 考 文 献

- [1] Liu Y, Wang T, Chen F S, et al. Infrared small target detection algorithm based on spatial signal to noise ratio [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2019, 17(1): 118-123.
刘炎, 王涛, 陈凡胜, 等. 基于时域信噪比的红外弱小目标检测[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2019, 17(1): 118-123.
- [2] Rong S H, Liu G, Zhou H X, et al. Infrared dim and small target background suppression based on the improved shearlet transform and the guide filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(2): 68-73.
荣生辉, 刘刚, 周慧鑫, 等. 基于改进的剪切波变换和引导滤波的红外弱小目标背景抑制方法[J]. *光子学报*, 2015, 44(2): 68-73.
- [3] Zeng Y L, Lan J H, Zou J L. Research on infrared dim-small target tracking algorithm with template sliding confidence constraint[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(9): 1771-1778.
曾溢良, 蓝金辉, 邹金霖. 滑动置信度约束的红外弱小目标跟踪算法研究[J]. *兵工学报*, 2017, 38(9): 1771-1778.
- [4] He Y J, Li M, Zhang J L, et al. Infrared small target detection method based on correlation filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0512001.
何玉杰, 李敏, 张金利, 等. 基于相关滤波器的红外弱小目标检测算法[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0512001.
- [5] Zhao D, Zhou H X, Qin H L, et al. Infrared dim-small target tracking based on guided image filtering and kernelized correlation filtering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0204004.
赵东, 周慧鑫, 秦翰林, 等. 基于引导滤波和核相关滤波的红外弱小目标跟踪[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0204004.
- [6] Lu F X, Chen X, Chen G L, et al. Dim and small target detection based on background adaptive multi-feature fusion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(3): 277-283.
陆福星, 陈忻, 陈桂林, 等. 背景自适应的多特征融合的弱小目标检测[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(3): 277-283.
- [7] Fan J L, Gao Y M, Wu Z H, et al. Detection algorithm of single frame infrared small target based on RPCA [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(11): 147-151.
樊俊良, 高永明, 吴止媛, 等. 基于 RPCA 的单帧红外弱小目标检测算法[J]. *兵器装备工程学报*, 2018, 39(11): 147-151.
- [8] Wang B. Small moving target detection in infrared image sequences based on temporal filtering [D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
王博. 红外序列图像中运动弱小目标时域检测方法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [9] Li Z H, Li X G. Infrared small moving target detection and tracking based on OpenCV[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2561-2565.
黎志华, 李新国. 基于 OpenCV 的红外弱小运动目标检测与跟踪[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(9): 2561-2565.
- [10] Wu H, Chen S X, Yang B F, et al. Robust improved Gaussian-sum cubature Kalman filter for infrared target tracking[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(1): 123-128.

- 吴昊, 陈树新, 杨宾峰, 等. 鲁棒的高斯和容积卡尔曼滤波红外目标跟踪算法[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(1): 123-128.
- [11] Zhang S, An B W, Pan S D. Infrared dim target detection based on temporal-spatial non-local similarity[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(11): 1110001.
张素, 安博文, 潘胜达. 基于时空非局部相似性的海上红外弱小目标检测[J]. 光子学报, 2018, 47(11): 1110001.
- [12] Wang T, Chen F S, Su X F. Research of infrared background suppression method based on anisotropic bilateral filtering[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(2): 119-126.
王涛, 陈凡胜, 苏晓锋. 基于各向异性双边滤波红外背景抑制方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(2): 119-126.
- [13] Gong J L, He X, Wei Z H, et al. Infrared dim and small target detection method using scale-space theory[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(9): 2566-2573.
龚俊亮, 何昕, 魏仲慧, 等. 采用尺度空间理论的红外弱小目标检测方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2566-2573.
- [14] Wang T. Study on high reliability detection method of infrared dim target in complex space environment [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
王涛. 复杂空间环境下红外弱小目标高可靠检测方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.