

结合帧差的核相关滤波弱小红外目标检测

王玉萍，曾毅

(郑州科技学院 信息工程学院, 河南 郑州 450064)

摘要: 为了提高红外目标检测的性能, 提出了一种结合帧差的核相关滤波弱小红外目标检测算法。算法首先通过核相关滤波训练当前帧获得最大回归值, 相对间隔帧求取差值, 以此进行循环移位, 从而实现对帧间背景运动的补偿; 再者借助帧间差分法提取当前帧相对运动特征, 增强区分弱小目标和红外背景的能力; 最后对相对运动特征进行阈值分割获得最终检测结果。仿真实验显示本算法能有效检测出复杂环境下红外弱小目标, 与其他同类算法相比, 本算法可以很好地对杂波和点状干扰源进行抑制, 获得较高的目标检测率, 同时将大量运算置于频域中, 运算效率也优于其他算法。

关键词: 红外图像; 弱小目标检测; 核相关滤波; 帧间运动补偿; 相对运动特征; 帧间差分

中图分类号: TP319; TN211

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2023)07-0755-13

Weak and Small Infrared Target Detection Combined With Frame Difference Kernel Correlation Filtering

WANG Yuping, ZENG Yi

(School of Information Engineering, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China)

Abstract: To improve the performance of infrared target detection, weak and small infrared target detection combined with frame difference kernel correlation filtering is proposed. First, the current frame is trained by kernel correlation filtering to obtain the maximum regression value. Then, the difference value is calculated relative to the interval frame to perform a cyclic shift to compensate for the background motion between frames. The relative motion features of the current frame are extracted using the interframe difference method, which enhances the ability to distinguish weak and small targets from the infrared background. Finally, threshold segmentation is performed on the relative motion features to obtain the final detection results. Simulation experiments show that the proposed algorithm effectively detected weak and small infrared targets in complex environments. Compared with similar algorithms, the proposed algorithm suppressed clutter and point-shaped interference sources, and achieved a higher target detection rate. Simultaneously, a large number of operations are placed in the frequency domain, and the operational efficiency is better than that of other algorithms.

Key words: infrared image, weak and small target detection, Kernel correlation filtering, interframe motion compensation, relative motion feature, inter frame difference

0 引言

红外目标检测是目标识别、目标监视与预警的基础, 由于红外检测属于无源检测, 自身不辐射能量, 隐蔽性强, 其在军民领域中得到广泛应用。目前随着现代军事技术发展和军事环境的要求, 需要尽早发现目标, 目标检测往往要在成像距离很远的条件下对仅有的几个像素进行识别。如何提高弱小目标的检测精

收稿日期: 2022-03-02; 修订日期: 2022-05-19。

作者简介: 王玉萍 (1979-), 女, 汉族, 河南焦作人, 硕士, 教授, 主要研究方向: 图像处理, 视觉与虚拟现实。E-mail: yuping_wang1979@126.com。

通信作者: 曾毅 (1980-), 男, 汉族, 广西桂林人, 硕士, 副教授, 主要研究方向: 视觉与虚拟现实及嵌入式。

基金项目: 河南省科技厅科技攻关项目 (222102210174)。

度和效率成为目前红外检测领域研究的热点, 针对单帧红外图像是很难区分弱小目标和干扰源, 但对于多帧图像可基于时域运动特征加以识别检测, 对此国内外专家进行了深入研究。比如帧间差分法是将相邻两帧红外图像差值运算^[1-2], 但该方法在背景和点状干扰源附近易产生残差, 影响后续检测; 多级假设检验法是对目标运动形式进行假设, 根据假定运动轨迹进行目标检测^[3-4], 但该方法难以去除点状干扰源所形成的

轨迹，误导目标检测；动态规划法被应用到红外弱小目标检测中取得了不错的效果^[5-6]；三维匹配滤波将红外弱小目标检测转化成三维空间上的速度匹配^[7-8]，但这两种方法没有区分目标和点状干扰源的匹配机制，弱小目标检测精度不高；时空对比法将对比度定义在时空剖面上，从而对时空背景区域进行抑制，增强对弱小目标的检测^[9-12]，但面对点状干扰源时，其与目标都表现为冲击信号，无法有效区分；光流估计法根据灰度不变原理计算红外图像的光流场，依据图像光流场信息识别弱小目标^[13-15]，但随着帧间距离的增大该方法对光流场估计的精度会随之降低，并且光流场计算易受噪声影响。以上这些常用方法在处理红外图像视场变化时，目标检测的精度会降低，计算复杂度也颇高。近年来，核相关滤波方法在目标识别领域取得了不错的效果^[16-19]。核相关滤波器根据当前和之前帧信息训练滤波器，基于此对实时帧进行相关性计算快速获得目标，检测精度和计算复杂度有一定的优势^[20-23]，为此，本文提出了一种结合帧差的核相关滤波弱小红外目标检测算法（Weak and Small Infrared Target Detection Combined With Frame Difference Kernel Correlation Filtering, KCF-FF）。

1 脊回归模型

核相关滤波利用脊回归模型对样本数据进行训练，这里先简单介绍脊回归模型及其简化求解。

脊回归模型的目标是寻找线性函数 $f(\mathbf{Z})$:

$$f(\mathbf{Z}) = \mathbf{W}^T \mathbf{Z} \quad (1)$$

使得样本数据 \mathbf{x}_i 的函数值与回归值 y_i 间的均方差取得最小值为：

$$\min_{\mathbf{W}} \sum_i (f(\mathbf{x}_i) - y_i)^2 + \alpha \|\mathbf{W}\|^2 \quad (2)$$

式中： α 表示正则化系数，其解为：

$$\mathbf{W} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X} + \alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (3)$$

式中： \mathbf{X} 表示样本矩阵； \mathbf{x}_i 为其行矩阵； \mathbf{y} 为回归值矩阵； \mathbf{I} 为单位矩阵。由于核滤波的频域计算量较大，对式(3)进行共轭转置，获得其复数：

$$\begin{aligned} \mathbf{W} &= (\mathbf{X}^H \mathbf{X} + \alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{X}^H \mathbf{y} \\ \mathbf{X}^H &= (\mathbf{X}^*)^T \end{aligned} \quad (4)$$

式中： \mathbf{X}^H 为共轭转置运算； \mathbf{X}^* 为矩阵 \mathbf{X} 的共轭复数矩阵。求式(4)的解析解，需要求解大型线性方程组，这极其耗时。矩阵的循环移位可简化计算过程，但前提条件是训练样本可由基础样本循环移位获得。

1.1 循环移位矩阵

将基础训练样本 \mathbf{x} 以向量表示：

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n] \quad (5)$$

以 \mathbf{x} 为基础样本循环移位构建训练样本 \mathbf{X} ：

$$\mathbf{X} = C(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \\ x_n, x_1, x_2, \dots, x_{n-1} \\ x_{n-1}, x_n, x_1, \dots, x_{n-2} \\ \dots \\ x_2, x_3, x_4, \dots, x_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

循环移位矩阵存在特殊的性质，即可被离散傅里叶变换矩阵对角化，由此可得：

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= \mathbf{F} \text{diag}(\hat{\mathbf{x}}) \mathbf{F}^H \\ \hat{\mathbf{x}} &= \mathbf{F}(\mathbf{x}) \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)中： \mathbf{F} 表示离散傅里叶变换矩阵； $\hat{\mathbf{x}}$ 表示向量 \mathbf{x} 的离散傅里叶变换。根据上式(7)，可简化式(4)中的 $\mathbf{X}^H \mathbf{X}$ ：

$$\mathbf{X}^H \mathbf{X} = \mathbf{F} \text{diag}(\hat{\mathbf{x}}^*) \mathbf{F}^H \mathbf{F} \text{diag}(\hat{\mathbf{x}}) \mathbf{F}^H \quad (8)$$

因为 $\mathbf{F}^H \mathbf{F} = \mathbf{I}$ ，上式(8)可得：

$$\mathbf{X}^H \mathbf{X} = \mathbf{F} \text{diag}(\hat{\mathbf{x}}^* \odot \hat{\mathbf{x}}) \mathbf{F}^H \quad (9)$$

式中： \odot 表示对角矩阵的点乘，根据式(9)对式(4)进行替换：

$$\begin{aligned} \mathbf{W} &= (\mathbf{X}^H \mathbf{X} + \alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{X}^H \mathbf{y} \\ &= (\mathbf{F} \text{diag}(\hat{\mathbf{x}}^* \odot \hat{\mathbf{x}}) \mathbf{F}^H + \alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{F} \text{diag}(\hat{\mathbf{x}}^*) \mathbf{F}^H \mathbf{y} \\ &= \mathbf{F}(\text{diag}(\hat{\mathbf{x}}^* \odot \hat{\mathbf{x}} + \alpha))^{-1} \mathbf{F}^H \mathbf{F} \text{diag}(\hat{\mathbf{x}}^*) \mathbf{y} \\ &= \mathbf{F} \text{diag}(\frac{\hat{\mathbf{x}}^*}{\hat{\mathbf{x}}^* \odot \hat{\mathbf{x}} + \alpha}) \mathbf{F}^H \mathbf{y} \end{aligned} \quad (10)$$

对上式(10)两边同时进行离散傅里叶变换，可得：

$$\widehat{\mathbf{W}} = \text{diag}(\frac{\hat{\mathbf{x}}^*}{\hat{\mathbf{x}}^* \odot \hat{\mathbf{x}} + \alpha}) \hat{\mathbf{y}} \quad (11)$$

式(11)简化为：

$$\widehat{\mathbf{W}} = \frac{\hat{\mathbf{x}}^* \odot \hat{\mathbf{y}}}{\hat{\mathbf{x}}^* \odot \hat{\mathbf{x}} + \alpha} \quad (12)$$

根据式(4)可知，由于矩阵求逆运算，脊回归的计算复杂度为 $O(n^3)$ ，若对训练样本改为矩阵循环移位，脊回归的计算复杂度可降为 $O(n \log n)$ 。

1.2 核脊回归

现实中并不是所有的回归都符合线性回归模型，

为了扩展表达能力, 将样本数据映射到非线性空间, 并基于此建立脊回归模型:

$$f(z) = \mathbf{W}^T \phi(z) \quad (13)$$

式(13)中测试样本数据 z 被映射为 $\phi(z)$, 而回归系数 \mathbf{W} 为非线性空间中各样本数据线性组合:

$$\mathbf{W} = \sum_i \beta_i \phi(x_i) \quad (14)$$

式(14)中 β 所在参数空间为对偶空间, 与回归系数 \mathbf{W} 所在空间一致, 这里将回归系数 \mathbf{W} 的优化转化为对参数 β 的优化。以核函数形式对 $\phi(x)$ 非线性空间下的内积进行表示:

$$\phi^T(x)\phi(x') = \kappa(x, x') \quad (15)$$

设核矩阵 $\mathbf{K}_{n \times n}$, 其内容为非线性空间中各样本数据间的内积, 表示如下:

$$K_{ij} = \kappa(x_i, x_j) \quad (16)$$

综上, 核脊回归模型的回归函数如下:

$$f(z) = \mathbf{W}^T \phi(z) = \sum_{i=1}^n \beta_i \kappa(z, x_i) \quad (17)$$

参考文献[24], 给出上式(17)的解:

$$\beta = (\mathbf{K} + \alpha I)^{-1} \mathbf{y} \quad (18)$$

式(18)中矩阵 β 由参数 β_i 构成, 为对偶空间的解, 若核矩阵 \mathbf{K} 为循环移位矩阵, 上式(18)可快速求解, 文献[24]给出了判断矩阵 \mathbf{K} 为循环移位矩阵的充分条件, 分析条件可知, 径向基和内积核函数都满足。若核矩阵 \mathbf{K} 为循环移位矩阵, 针对式(7)借助离散傅里叶变换矩阵对矩阵 \mathbf{K} 对角化:

$$\mathbf{K} = F \text{diag}(\hat{\mathbf{k}}^{xx}) F^H \quad (19)$$

上式(19)中 \mathbf{k}^{xx} 表示核矩阵 \mathbf{K} 第一行, $\hat{\mathbf{k}}^{xx}$ 表示 \mathbf{k}^{xx} 的傅里叶变换, 将式(19)代入式(18)可得:

$$\begin{aligned} \beta &= (\mathbf{K} + \alpha I)^{-1} \mathbf{y} \\ &= (F \text{diag}(\hat{\mathbf{k}}^{xx}) F^H + \alpha I)^{-1} \mathbf{y} \\ &= F(\text{diag}(\hat{\mathbf{k}}^{xx} + \alpha))^{-1} F^H \mathbf{y} \\ &= F \text{diag}\left(\frac{1}{\hat{\mathbf{k}}^{xx} + \alpha}\right) F^H \mathbf{y} \end{aligned} \quad (20)$$

对上式(20)离散傅里叶变换, 可得:

$$\hat{\beta} = \text{diag}\left(\frac{1}{\hat{\mathbf{k}}^{xx} + \alpha}\right) \hat{\mathbf{y}} \quad (21)$$

进一步简化为:

$$\hat{\beta} = \frac{\hat{\mathbf{y}}}{\hat{\mathbf{k}}^{xx} + \alpha} \quad (22)$$

通过上式(22)可知, 当训练样本所构成的矩阵为循环位移矩阵时, 只需计算出基础训练样本数据 \mathbf{x} 的 \mathbf{k}^{xx} , 代入式(22)可快速求解核脊回归模型。

1.3 核滤波

基础训练样本 \mathbf{x} 经循环位移获得训练样本, 据此可根据式(23)求取测试样本 z 回归值:

$$f(z) = \mathbf{k}^{xz} \beta \quad (23)$$

式中: \mathbf{k}^{xz} 表示向量 \mathbf{x} 和 z 的核相关函数, 其第 j 个元素如下:

$$\mathbf{k}_j^{xz} = \kappa(z, \mathbf{x} \mathbf{Q}^{j-1}) \quad (24)$$

式中: \mathbf{Q} 为置换矩阵, 表示如下:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

定义 \mathbf{K}^z 表示所有训练样本和测试样本的核矩阵, 其由基础训练样本 \mathbf{x} 和基础测试样本 z 的核函数确定, 可表示为:

$$\mathbf{K}^z = C(\mathbf{k}^{xz}) \quad (26)$$

对于测试样本的回归值, 可由以下获取:

$$f(z) = \mathbf{K}^z \beta \quad (27)$$

式(27)中: $f(z)$ 表示所有测试样本的回归值, 其可将 \mathbf{k}^{xz} 看作滤波器, 那么 $f(z)$ 就可看作滤波器 \mathbf{k}^{xz} 对 β 的滤波结果, 基于此, 计算公式(27)称之为核滤波。借助离散傅里叶变换矩阵对核矩阵 \mathbf{K}^z 对角化, 可得:

$$\hat{f}(z) = \hat{\mathbf{k}}^{xz} \odot \hat{\beta} \quad (28)$$

根据公式(28)可完成核脊回归模型检测, 这里将核相关滤波简化为式(22)和(28)两步计算, 其中式(22)涉及计算 \mathbf{k}^{xx} , 式(28)涉及计算 \mathbf{k}^{xz} , 核相关滤波计算任务繁重。

1.4 核函数简化计算

通过上节核滤波的推导可知, 核相关函数的计算复杂度与核函数类型有关, 会影响整个核滤波的效率。本节分别分析内积型和径向基核函数的计算。内积型核函数(含多项式)表示如下:

$$\kappa(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = h(\mathbf{x}_1 \mathbf{x}_2^T) \quad (29)$$

式(29)中: $h(x)$ 代表某函数, 向量 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ 的核函数:

$$k^{x_1 x_2} = h((C(\mathbf{x}_1) \mathbf{x}_2^T)) \quad (30)$$

对 $C(\mathbf{x}_1)$ 对角化, 可得:

$$k^{x_1 x_2} = h(F^{-1}(\hat{\mathbf{x}}_1 \otimes \hat{\mathbf{x}}_2)) \quad (31)$$

通过式(31)可知内积型核函数可通过离散傅里叶变换和点乘获得计算结果, 计算复杂度为 $O(n \log n)$ 。径向基核函数表示如下:

$$\kappa(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = g(\|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2\|^2) \quad (32)$$

式(32)中: $g(x)$ 为高斯核函数, 这是取将上式(32)展开:

$$k^{x_1 x_2} = g(\|\mathbf{x}_1\|^2 + \|\mathbf{x}_2\|^2 - 2\mathbf{x}_1 \mathbf{x}_2^T) \quad (33)$$

可将上式(33)中 $\|\mathbf{x}_1\|^2$ 和 $\|\mathbf{x}_2\|^2$ 视为常量, 故而将式(33)看作内积型, 根据式(31)求解内积型核函数, 可得径向基核函数结果如下:

$$k^{x_1 x_2} = g(\|\mathbf{x}_1\|^2 + \|\mathbf{x}_2\|^2 - 2F^{-1}(\hat{\mathbf{x}}_1 \otimes \hat{\mathbf{x}}_2)) \quad (34)$$

以高斯径向基为例, 其相关核函数为:

$$k^{x_1 x_2} = \exp\left(-\frac{(\|\mathbf{x}_1\|^2 + \|\mathbf{x}_2\|^2 - 2F^{-1}(\hat{\mathbf{x}}_1 \otimes \hat{\mathbf{x}}_2))}{\eta^2}\right) \quad (35)$$

式(35)中: η 表示带宽, 通过上式(35)可知径向基核函数的核函数也可通过离散傅里叶变换和点乘获得计算结果, 其计算复杂度为 $O(n \log n)$ 。

2 本文算法

本节将利用核相关滤波算法对帧间背景运动进行补偿, 借助帧间差分对相对运动进行特征提取, 最后通过阈值化完成红外弱小运动目标的检测。本文算法的示意图如图 1 所示。

2.1 本文算法各阶段

帧间运动补偿阶段: 通过示意图可知, 在帧间运动补偿阶段, 算法以 $i-t$ 帧作为基础训练样本 x , 训练核脊回归模型, 以 i 帧为基础测试样本 z , 借助核滤波获得所有基础测试样本回归值, 取回归值中最大值, 计算其相对于基础测试样本的差值 μ 。然后将 $i-t$ 帧 x 整体以位移量 μ 进行循环移位获得对第 i 帧的估计 z' , 实现对帧间背景运动补偿。

相对运动特征提取阶段: 对于红外图像序列中的运动目标而言, 由于弱小目标相对于背景进行了运动, 因此弱小目标在测试样本 z 和估计帧 z' 中的位置也发生了变化, 那么对 z 和 z' 进行帧间差分可以进一

步凸显目标, 同时可以抑制背景各种杂波。基于此, 本阶段将 z 和 z' 进行帧间差分获得相对运动特征图, 经过循环移位, z 和 z' 的差分图在边缘区域会残留背景 (如图 1 相对运动特征提取结果), 设置边缘区域宽度 d , 通过对边缘宽度内置零, 改善相对运动特征图。

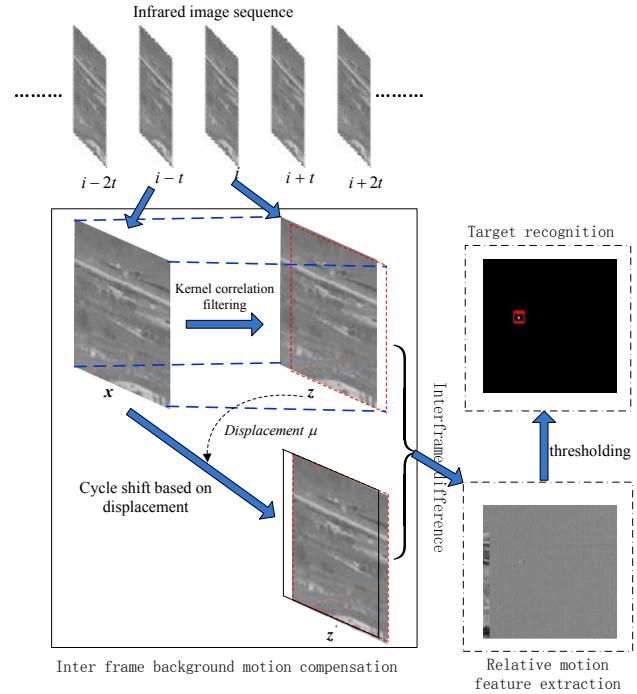


图 1 本文算法示意图

Fig.1 Schematic diagram of this algorithm

目标识别阶段: 经过前两个阶段, 弱小目标处于相对运动特征图中显著位置, 为了有效识别, 采用如下阈值分割法获得最终二值化检测结果:

$$T = \varpi + r \times \xi \quad (36)$$

式中: ϖ 表示相对运动特征图各像素特征值均值; ξ 表示相对运动特征图各像素特征值标准差; r 为阈值, 一般取值 [20, 40]。

这里参考文献[25]的思想, 在帧差法中引入面积阈值在判断目标运动的大体帧数。首先获得当前 i 帧红外图像和前 t 帧的灰度图像 $F_i(x, y)$ 、 $F_{i-t}(x, y)$, 获得差分图像 $D_t(x, y)$:

$$D_t(x, y) = |F_i(x, y) - F_{i-t}(x, y)| \quad (37)$$

由于 $D_t(x, y)$ 中运动目标像素点灰度值较高, 这里借助最大类间方差获得自适应阈值 T_t 。而后记二值图像 $R_t(x, y)$ 中灰度值为 1 像素点个数为 M , 若 M 小于阈值 T_t , 则增大间隔帧数 ($t=t+1$), 重复以上过程, 直到 M 大于阈值 T_t 为止, 此时 t 为弱小目标运动的最小帧数。

2.2 算法流程

综合以上, 本文算法伪代码如下:

Input: 第 $i-t$ 和 i 帧红外图像, 回归值 y , 带宽 η_y , 正则化系数 α , 边缘区域宽度 d , 间隔帧数 t , 阈值 r 。

Step1: 以 $i-t$ 帧作为基础训练样本 x , 以 i 帧为基础测试样本 z ;

Step2: 根据式(35)求解核相关函数 k^{xx} ;

Step3: 分别对核相关函数 k^{xx} 和回归值 y 傅里叶变换, 获得 \hat{k}^{xx} 和 \hat{y} ;

Step4: 根据式(22)求得对偶空间解 β 及傅里叶变换值 $\hat{\beta}$;

Step5: 根据式(35)求解核相关函数 k^{xz} , 并进行傅里叶变化获得 \hat{k}^{xz} ;

Step6: 根据 \hat{k}^{xz} 和 $\hat{\beta}$, 代入式(28), 获得 $\hat{f}(z)$,

$f(z)$ 是由所有测试样本 z 回归值组成的二维矩阵;

Step7: 根据 $f(z)$ 获得测试样本回归值最大值位置 (a_{\max}, o_{\max}) ;

Step8: 计算第 i 帧红外图像相对于第 $i-t$ 的位移量 $\mu = (a_{\max} - 1, o_{\max} - 1)$;

Step9: 对第 $i-t$ 帧红外图像以位移量 μ 平移, 得到第 i 帧图像估计 z' ;

Step10: 对 z' 和 z 差分获得差分图并按照设定边缘区域宽度 d 进行置零, 得到相对运动特征图;

Step11: 根据式(36)获得分割阈值 T ;

Step12: 根据 T 对相对运动特征图进行阈值分割, 得到第 i 帧红外图像二值化结果。

假设第 i 帧红外图像拥有 n 个像素, 核相关滤波的复杂度为 $O(n \log n)$, 那么基于核相关滤波的帧间运动补偿计算复杂度为 $O(n \log n)$, 帧间差分计算复杂度为 $O(n)$, 运动特征提取计算复杂度为 $O(n)$, 阈值分割计算复杂度也为 $O(n)$, 综上可知, 本文算法的整体计算复杂度最大为 $O(n)$, 运算开销较低。

3 仿真实验与对比分析

本文利用4幅红外对地观测图像来验证算法有效性和优越性。硬件环境为Intel(R) Core(TM)i5-10500@3.1GHz, RAM:8GB, 软件环境为: Matlab R2016b。其中实验4种测试场景都是200帧, 图像大小为 256×256 , 根据前述目标识别估算可知, 弱小目标运动速度在8帧左右, 这与后面间隔帧参数 t 的验证基本一致。实验场景具体如图2所示。

在4种测试场景中都包含弱小目标(方框内),

其中场景一存在树木、道路等多种杂波, 背景存在高强度点状干扰源; 场景二存在沟壑、河道、树木多种杂波, 目标强度低; 场景三存在道路、树木、池塘等多种杂波, 边缘干扰较强; 红外图像四存在道路、树木、线杆等多种杂波, 线性杂波干扰较强。4种测试场景都有明显背景运动。

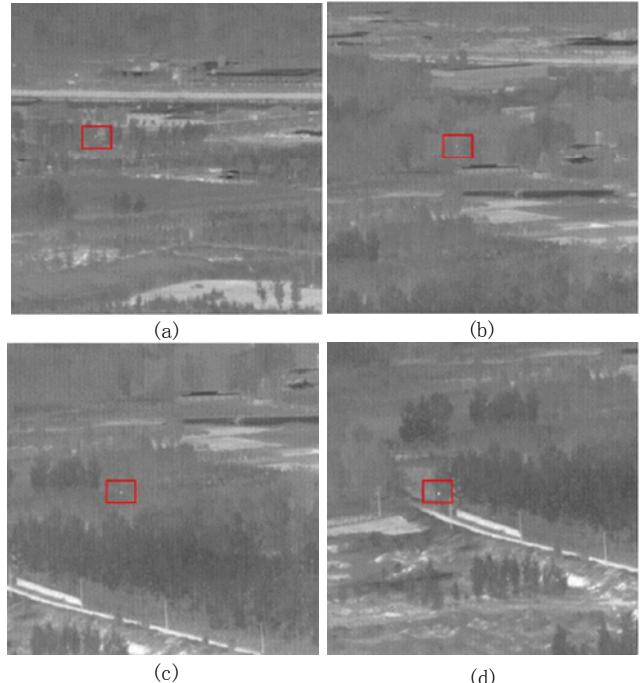


图2 测试场景示意图。(a)场景一; (b)场景二; (c)场景三; (d)场景四

Fig.2 Schematic diagram of testing scenario. (a) Scene one; (b) Scene two; (c) Scene three; (d) Scene four

3.1 参数设置

在算法的初始化阶段需要确定其中的参数, 有些参数是根据经验值设定, 其中参考文献[26], 将公式(22)中回归值 y 设置呈高斯分布, $\eta_y = \sqrt{N}/10$, 正则化系数 $\alpha = 10^{-3}$, 采用高斯径向基核函数, 设公式(35)中带宽 $\eta = 1$, 边缘区域宽度 $d = 20$ 。此外帧间运动补偿阶段, 间隔帧数 t 也是需要设定的参数, 为了获得高质量差分结果, 这里分别测试 $t = 1, 3, 5, 10$ 时4种测试场景的相对运动特征图。

图3~图6的(a)~(d)分别为各场景中 $t = 1, 3, 5, 10$ 时的单帧图像, 图3~图6的(e)~(h)分别对应 $t = 1, 3, 5, 10$ 单帧图像的相对运动特征图。通过图3~图6的结果可以看出, 当 $t = 1$ 时, 4种场景的相对运动特征不明显, 当 $t = 3$ 和 $t = 5$ 时, 4种场景下的相对运动特征逐渐明显, 当 $t = 10$ 时, 弱小目标与背景相对运动特征有较为明显的差异, 由于间隔帧的设置与弱小目标的实际运动有关, 结合4种场景中目标的实际运

动, 这里设置 $t=10$, 当目标运动过快时, 可根据情况适当调小间隔帧数。

3.2 算法有效性

利用本算法对 4 种场景进行目标检测, 以验证本文算法的有效性, 结果如图 7~图 10 所示。

图 7~图 10 为 4 种场景目标检测结果, 其中图(a)

表示测试场景中的当前帧, 图(b)表示当前帧之前 10 帧的单帧红外图像, 图(c)表示图(a)和图(b)的差分结果, 图(d)表示图(b)经过运动补偿后的结果, 图(e)表示图(a)与图(d)差分结果, 图(f)表示将图(e)边缘置零结果, 图(g)表示最终相对运动特征图, 图(h)表示真实目标图。

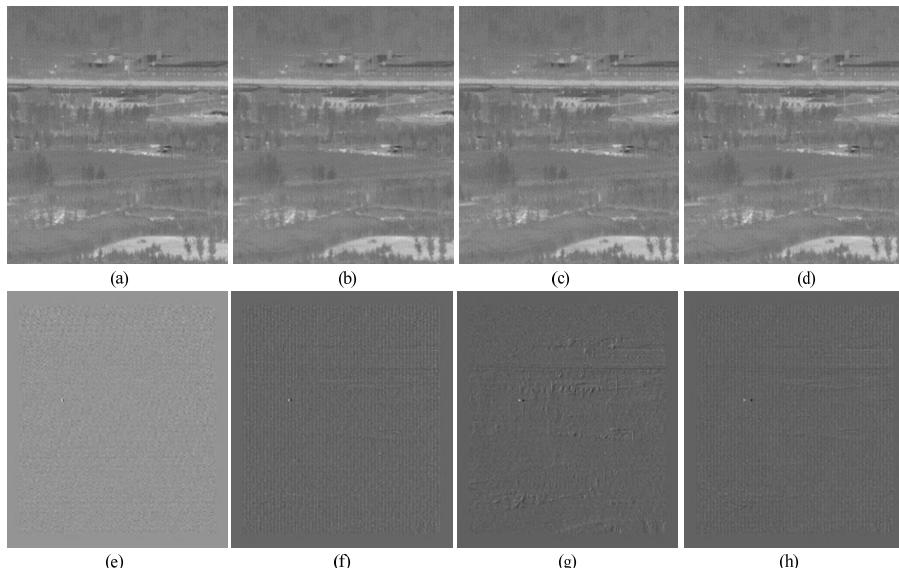


图 3 场景一在不同间隔帧数下相对特征。(a)第 1 帧图像; (b) 第 3 帧图像; (c)第 5 帧图像; (d)第 10 帧图像; (e)第 1 帧图像相对运动特征图; (f)第 3 帧图像相对运动特征图; (g)第 5 帧图像相对运动特征图; (h)第 10 帧图像相对运动特征图

Fig.3 Relative characteristics of Scene one at different interval frames. (a) First frame image; (b) Third frame image; (c) Fifth frame image; (d) Tenth frame image; (e) Relative motion feature of the first frame image; (f) Relative motion feature of the third frame image; (g) Relative motion feature of the fifth frame image; (h) Relative motion feature of the tenth frame image

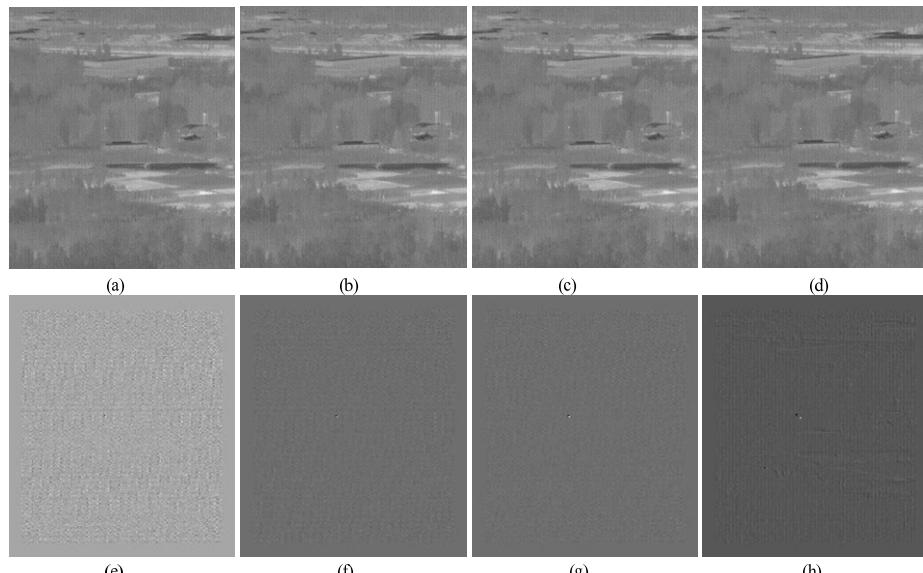


图 4 场景二在不同间隔帧数下相对特征。(a)第 1 帧图像; (b) 第 3 帧图像; (c)第 5 帧图像; (d)第 10 帧图像; (e)第 1 帧图像相对运动特征图; (f)第 3 帧图像相对运动特征图; (g)第 5 帧图像相对运动特征图; (h)第 10 帧图像相对运动特征图

Fig.4 Relative characteristics of Scene two at different interval frames. (a) First frame image; (b) Third frame image; (c) Fifth frame image; (d) Tenth frame image; (e) Relative motion feature of the first frame image; (f) Relative motion feature of the third frame image; (g) Relative motion feature of the fifth frame image; (h) Relative motion feature of the tenth frame image

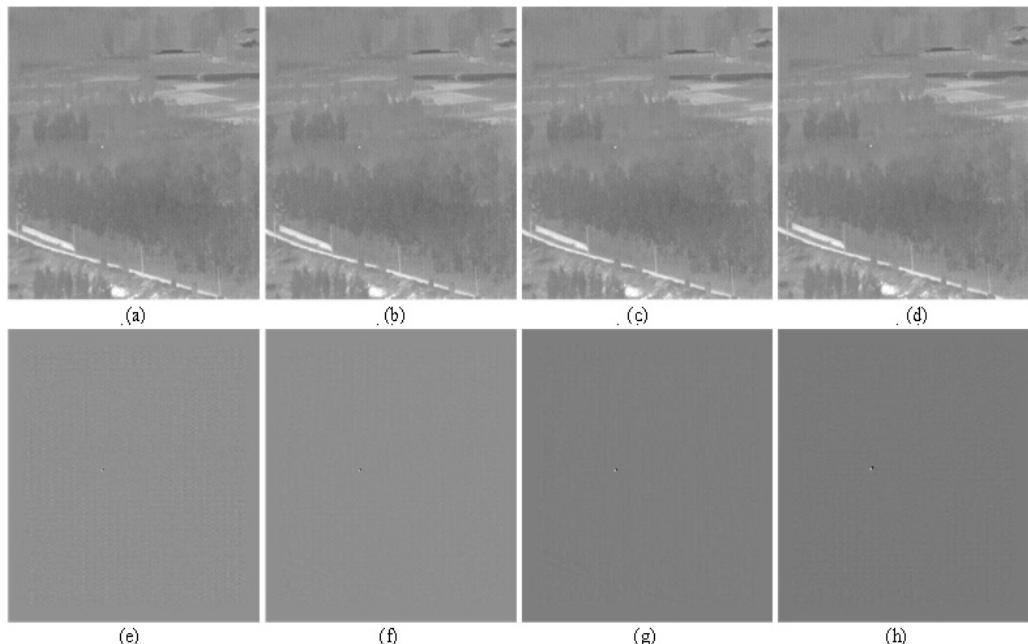


图 5 场景三在不同间隔帧数下相对特征。(a)第 1 帧图像; (b) 第 3 帧图像; (c)第 5 帧图像; (d)第 10 帧图像; (e)第 1 帧图像相对运动特征图; (f)第 3 帧图像相对运动特征图; (g)第 5 帧图像相对运动特征图; (h)第 10 帧图像相对运动特征图

Fig.5 Relative characteristics of Scene three at different interval frames. (a) First frame image;(b) Third frame image;(c) Fifth frame image; (d)Tenth frame image;(e) Relative motion feature of the first frame image;(f) Relative motion feature of the third frame image;(g) Relative motion feature of the fifth frame image;(h) Relative motion feature of the tenth frame image

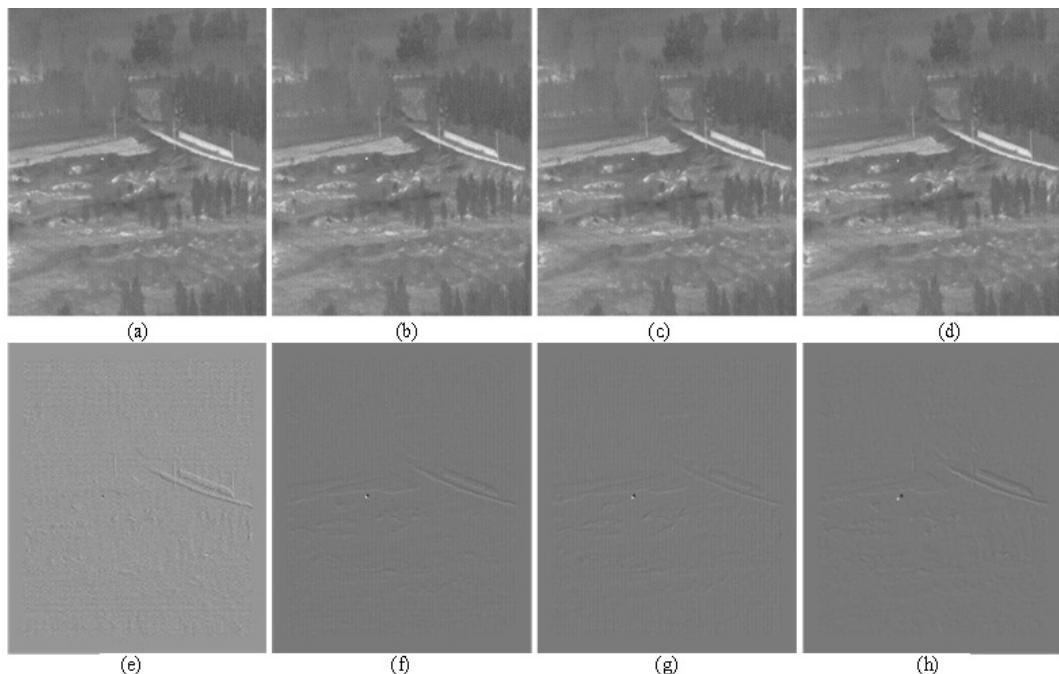


图 6 场景四在不同间隔帧数下相对特征。(a)第 1 帧图像; (b) 第 3 帧图像; (c)第 5 帧图像; (d)第 10 帧图像; (e)第 1 帧图像相对运动特征图; (f)第 3 帧图像相对运动特征图; (g)第 5 帧图像相对运动特征图; (h)第 10 帧图像相对运动特征图

Fig.6 Relative characteristics of Scene four at different interval frames. (a) First frame image;(b) Third frame image;(c) Fifth frame image; (d)Tenth frame image;(e) Relative motion feature of the first frame image;(f) Relative motion feature of the third frame image;(g) Relative motion feature of the fifth frame image;(h) Relative motion feature of the tenth frame image

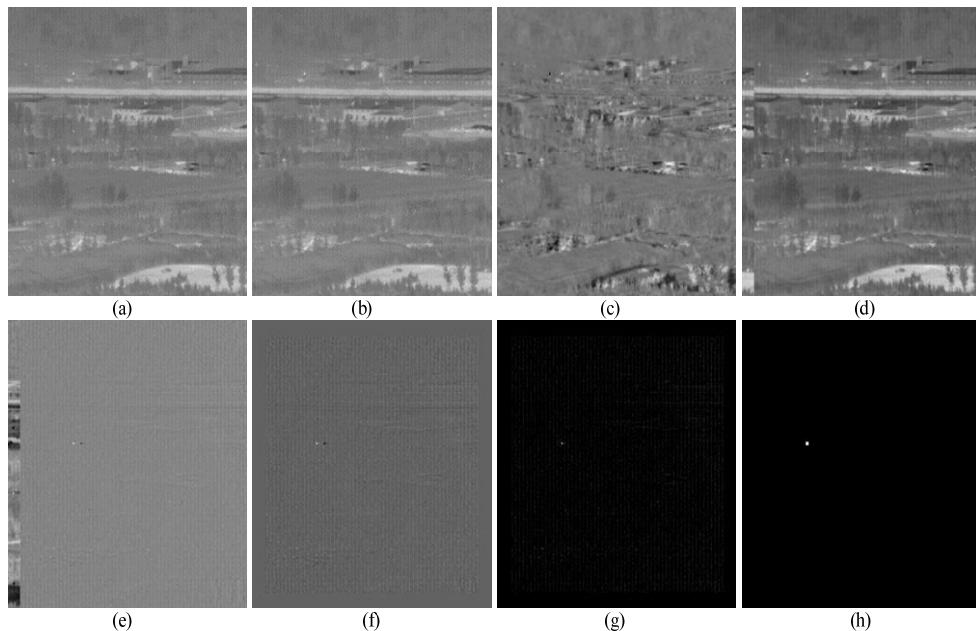


图 7 场景一检测结果。(a)场景一单帧图像; (b)图 a 前 10 帧红外图像; (c)图 a 和图 b 的差分结果; (d)图 b 运动补偿结果; (e) 图 a 与图 d 差分结果; (f)图 e 边缘置零结果; (g)相对运动特征图; (h)目标检测结果

Fig.7 Detection results of scenario one. (a)Single frame image in scene one; (b)The first ten infrared images of Figure a; (c)The difference results of Figures a and b; (d)Motion compensation results in Figure b; (e)Difference Results of Figures a and d;(f) The result of edge zeroing in Figure e;(g)Relative motion features; (h)Target detection results

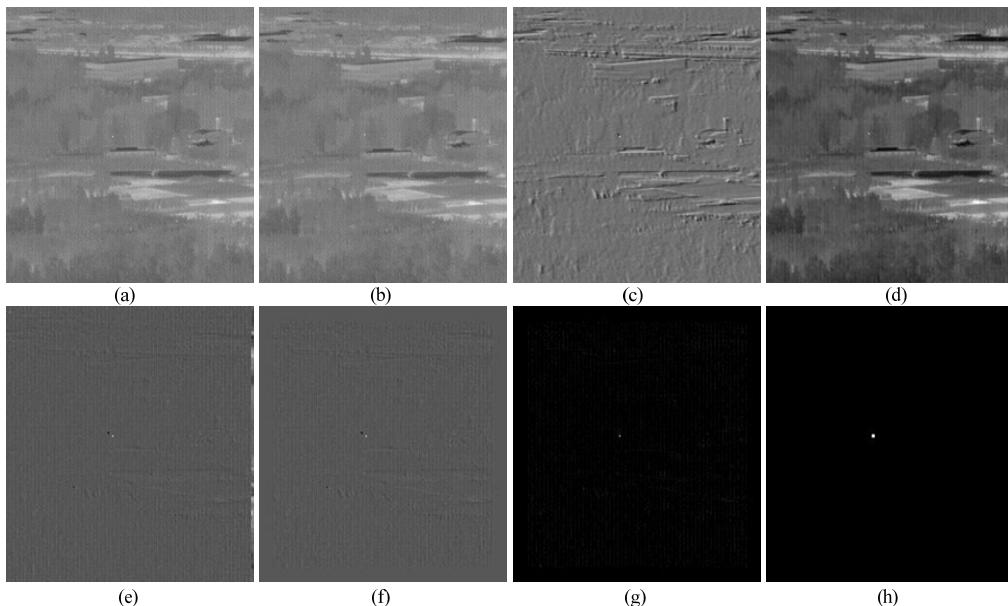


图 8 场景二检测结果。(a)场景二单帧图像; (b)图 a 前 10 帧红外图像; (c)图 a 和图 b 的差分结果; (d)图 b 运动补偿结果; (e) 图 a 与图 d 差分结果; (f)图 e 边缘置零结果; (g)相对运动特征图; (h)目标检测结果

Fig.8 Detection results of scenario two. (a)Single frame image in scene two;(b)The first ten infrared images of Figure a;(c)The difference results of Figures a and b;(d)Motion compensation results in Figure b;(e)Difference Results of Figures a and d;(f) The result of edge zeroing in Figure e; (g)Relative motion features;(h)Target detection results

从图 7(c)~图 10(c)可以看出,由于背景在两帧红外图像间有明显运动,将当前红外图像与之前 10 帧红外图像进行差分会产生背景杂波干扰;从图 7(e)~图 10(e)可以看出,经过背景运动补偿,所得的差分图

中背景杂波被明显抑制;从图 7(g)~图 10(g)可以看出,在最终的结果中算法有效将背景信息过滤,弱小目标被完整检测出。

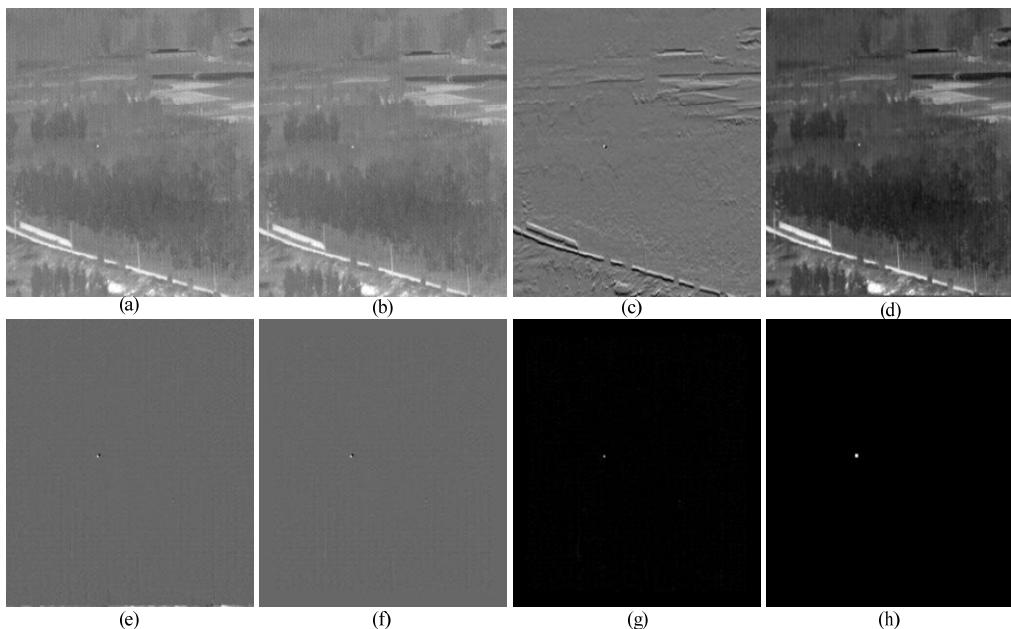


图9 场景三检测结果。(a)场景三单帧图像; (b)图 a 前 10 帧红外图像; (c)图 a 和图 b 的差分结果; (d)图 b 运动补偿结果; (e) 图 a 与图 d 差分结果; (f)图 e 边缘置零结果; (g)相对运动特征图; (h)目标检测结果

Fig.9 Detection results of scenario three. (a)Single frame image in scene three;(b)The first ten infrared images of Figure a;(c)The difference results of Figures a and b;(d)Motion compensation results in Figure b;(e)Difference Results of Figures a and d;(f) The result of edge zeroing in Figure e;(g)Relative motion features;(h)Target detection results

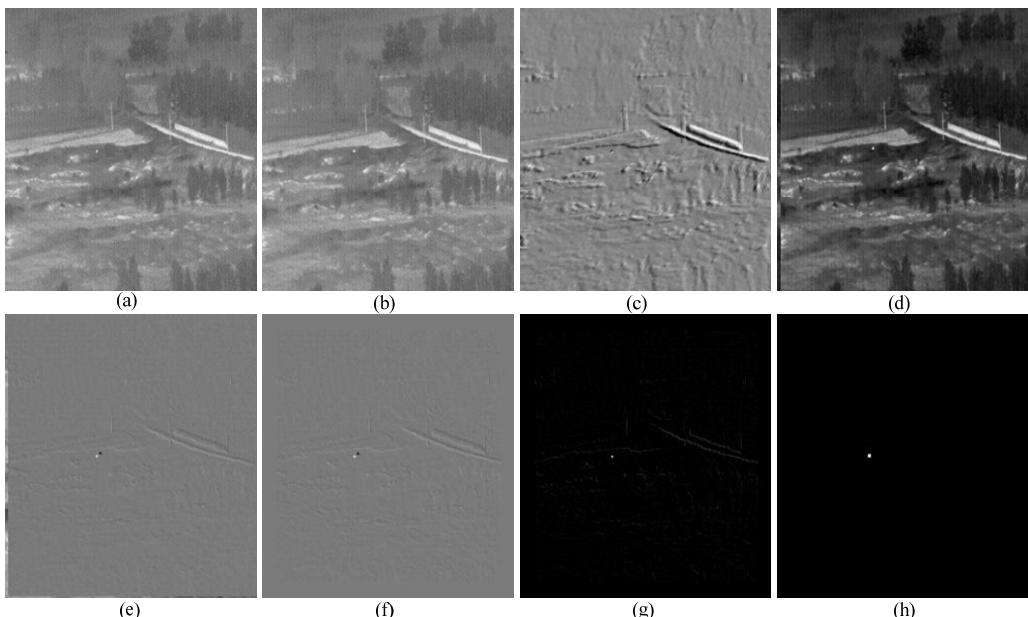


图10 场景四检测结果。(a)场景四单帧图像; (b)图 a 前 10 帧红外图像; (c)图 a 和图 b 的差分结果; (d)图 b 运动补偿结果; (e) 图 a 与图 d 差分结果; (f)图 e 边缘置零结果; (g)相对运动特征图; (h)目标检测结果

Fig.10 Detection results of scenario four. (a)Single frame image in scene four;(b)The first ten infrared images of Figure a;(c)The difference results of Figures a and b;(d)Motion compensation results in Figure b;(e)Difference Results of Figures a and d;(f) The result of edge zeroing in Figure e;(g)Relative motion features;(h)Target detection results

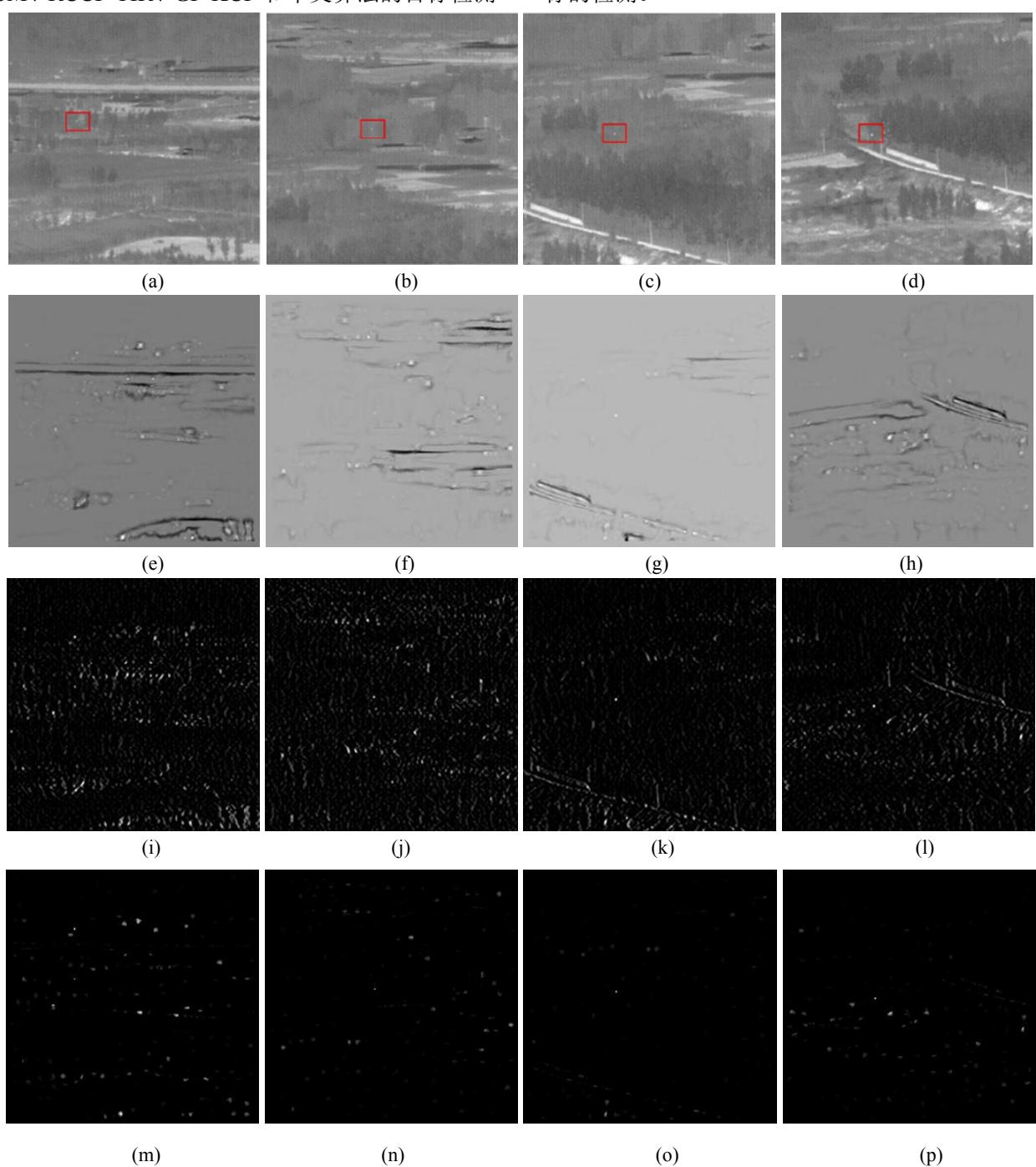
3.3 算法优越性

为了验证本文算法的优越性,引入当前或经典红外目标检测算法进行仿真对比。4种对比算法分别为:

频域核滤波目标检测算法 (Aerial infrared target tracking algorithm based on kernel correlation filters under complex interference environment, GF-KCF) [21]、

多尺度块对比检测算法 (Multiscale Patch-based Contrast Measure for small infrared target detection, MPCM)^[27]、相对性局部对比检测算法 (Infrared small target detection utilizing the multiscale Relative Local Contrast Measure, RLCM)^[28]、自适应特征融合目标检测 (Robust thermal infrared object tracking with continuous correlation filters and adaptive feature fusion, RCCF-TIR)^[29]，目标检测结果如图 11 所示。

图 11 的第一行为 4 种测试场景，弱小目标已被红色方框标出，第二行~第六行分别为 MPCM、RLCM、RCCF-TIR、GF-KCF 和本文算法的目标检测



结果。MPCM 虽然对杂波有较好的抑制,但基本无法抑制点状干扰源,弱小目标无法识别; RLCM 结果存在杂波,无法辨识弱小目标; RCCF-TIR 有效对杂波进行了抑制,但对点状干扰源的抑制还有待提高,弱小目标虽能被检测但混杂在点状干扰源中,辨识度不高; GF-KCF 对杂波和点状干扰源都有很好的抑制,弱小目标也基本识别,但对场景四中目标识别时,背景抑制过度; 本文算法 (KCF-FF) 利用帧间运动补偿实现了前后两帧图像的匹配,可以很好地抑制点状干扰源和明显的帧间运动背景,较好实现了对弱小目标的检测。

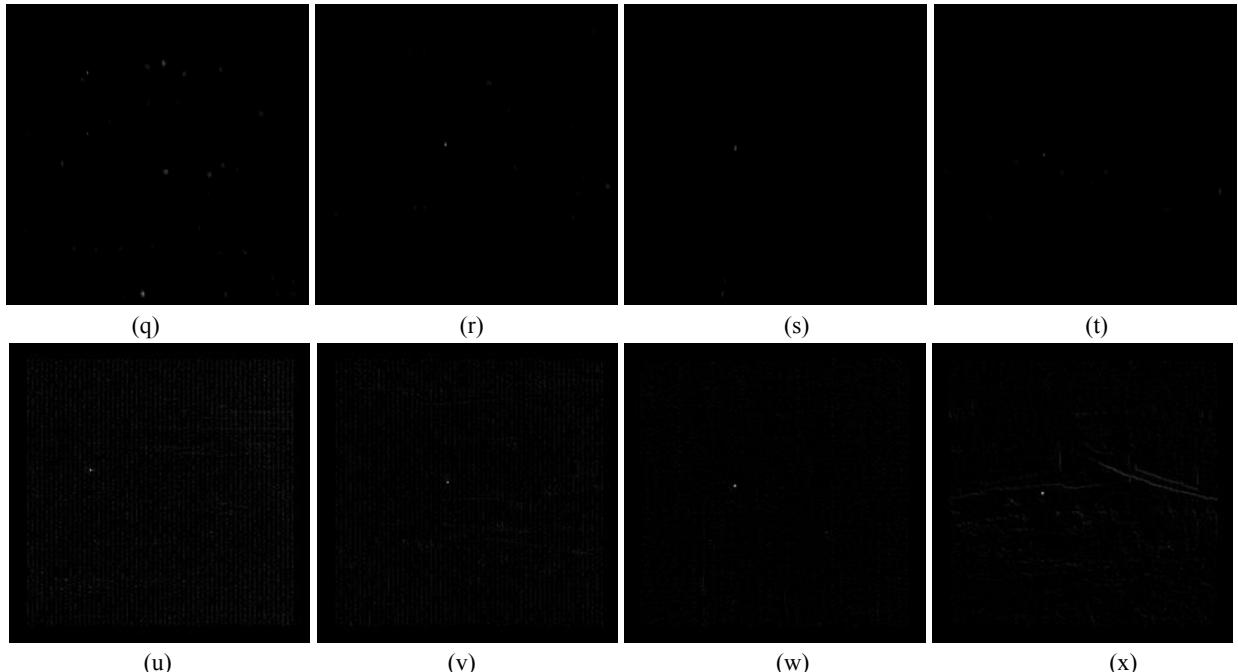


图 11 五种算法在 4 种测试场景中的目标检测结果。(a)场景一; (b)场景二; (c)场景三; (d)场景四; (e)-(h)算法 MPCM 在 4 种测试场景中的目标检测结果; (i)-(l)算法 RLCM 在 4 种测试场景中的目标检测结果; (m)-(p)算法 RCCF-TIR 在 4 种测试场景中的目标检测结果; (q)-(t)算法 GF-KCF 在 4 种测试场景中的目标检测结果; (u)-(x)算法 KCF-FF 在 4 种测试场景中的目标检测结果

Fig.11 Target detection results of five algorithms in four test scenarios. (a) Scene one;(b) Scene two;(c) Scene three;(d) Scene four; (e)-(h)Target detection results of MPCM algorithm in four test scenarios;(i)-(l)Target detection results of RLCM algorithm in four test scenarios; (m)-(p)Target detection results of RCCF-TIR algorithm in four test scenarios;(q)-(t)Target detection results of GF-KCF algorithm in four test scenarios;(u)-(x)Target detection results of KCF-FF algorithm in four test scenarios

为了更直观地对比各算法的性能,这里采用 ROC 曲线(Receiver Operating Characteristic curve, ROC)和曲线下面积 AUC(Area Under Curve, AUC)来定量评价,其中 ROC 曲线以检测率 TPR(True Positive Rate, TPR)为纵坐标,以虚警率 FPR(False Positive Rate, FPR)为横坐标,理想状态下, $TPR=1$, $FPR=0$,也就是 ROC 曲线越靠近左上方越好,而曲线下

面积 AUC 越大,算法性能越好,各算法在红外图像上的 ROC 曲线如图 12 所示。

图 12(a)~(d)分别为各算法在测试场景一~测试场景四上的 ROC 曲线,其中本文算法(KCF-FF)的 ROC 曲线都最靠近左上角,面对强点状干扰和多种杂波都表现出了较高的检测性能。各算法在不同测试环境下的 AUC 指标如表 1 所示。

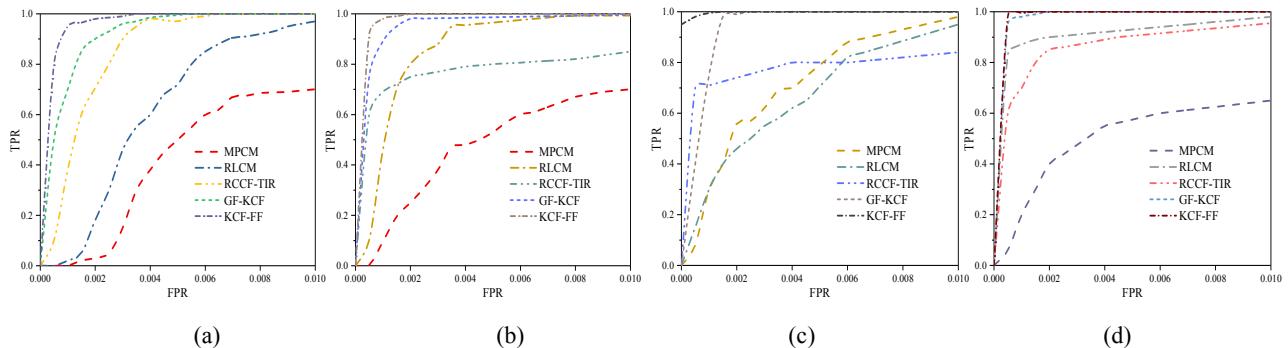


图 12 各算法在 4 种测试场景上的 ROC 曲线。(a)五种算法在场景一上的 ROC 曲线; (b) 五种算法在场景二上的 ROC 曲线; (c) 五种算法在场景三上的 ROC 曲线; (d) 五种算法在场景四上的 ROC 曲线

Fig.12 ROC curve of each algorithm under four testing scenarios. (a) ROC curves of five algorithms on scenario one;(b) ROC curves of five algorithms on scenario two;(c) ROC curves of five algorithms on scenario three;(d) ROC curves of five algorithms on scenario four

由表1各算法在不同测试场景上的AUC值可以看出,本文算法的AUC值最高,其次是GF-KCF,这与各算法在测试场景上的ROC曲线一致,体现了本文弱小目标检测的优异性能。从表2各算法在不同测试场景下运行时间看,GF-KCF的运行时间最少,本文算法次之,但两者的运行时间差距不大,在可控范围内。

表1 各算法在4种测试场景下AUC值

Table 1 AUC value of each algorithm under four testing scenarios

Algorithm	Test scenario			
	Scene One	Scene Two	Scene Three	Scene Four
MPCM	0.9252417	0.9878632	0.9964728	0.9397536
RLCM	0.9933118	0.9945269	0.9982756	0.9528677
RCCF-TIR	0.9961529	0.9953715	0.9989752	0.9874292
GF-KCF	0.9982573	0.9979236	0.9990135	0.9946382
KCF-FF	0.9999892	0.9997392	0.9999948	0.9986514

表2 各算法在4种测试场景下运行时间

Table 2 The running time of each algorithm under four testing scenarios

Algorithm	Test scenario			
	Scene One	Scene Two	Scene Three	Scene Four
MPCM	0.038	0.036	0.028	0.043
RLCM	4.082	4.017	3.825	4.263
RCCF-TIR	0.052	0.049	0.035	0.059
GF-KCF	0.019	0.018	0.011	0.022
KCF-FF	0.025	0.024	0.017	0.031

4 结论

本文提出了一种结合帧差的核相关滤波弱小红外目标检测算法,借助核相关滤波补偿帧间背景运动,利用帧间差分法提取相对运动特征,通过阈值分割获得最终目标检测结果。对比实验可知,本算法取得了较高的目标检测率和运算效率。算法主要利用图像序列的时域和频域特征,而单帧图像还有空域特征,如何多重利用红外序列图像的时域、频域和空域特征来进一步提高目标检测的精度将是本文下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] CHENG Y H, WANG J. A motion image detection method based on the inter-frame difference method[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, **490**: 1283-1286.
- [2] HE L, GE L. CamShift target tracking based on the combination of inter-frame difference and background difference[C]//2018 37th Chinese Control Conference(CCC). IEEE, 2018: 9461-9465.
- [3] Novikov A, Reyes-Pérez P. Optimal multistage sequential hypothesis testing[J]. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2020, **205**: 219-230.
- [4] Shamsadin Nejad A, Zaimbashi A. Multistage target detector based on M-ary hypothesis testing approach in multi-channel passive bistatic radars to improve target range resolution[J]. *Tabriz Journal of Electrical Engineering*, 2019, **49**(3): 1141-1152.
- [5] FAN X, XU Z, ZHANG J, et al. Infrared dim and small targets detection method based on local energy center of sequential image[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, **2017**: 4572147.
- [6] CHEN H, ZHANG H, YANG Y, et al. Small target detection based on infrared image adaptive[J]. *International Journal on Smart Sensing & Intelligent Systems*, 2015, **8**(1): 497-515.
- [7] REN X, WANG J, MA T, et al. Infrared dim and small target detection based on three-dimensional collaborative filtering and spatial inversion modeling[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, **101**: 13-24.
- [8] LIU X, ZUO Z. A dim small infrared moving target detection algorithm based on improved three-dimensional directional filtering[C]//Chinese Conference on Image and Graphics Technologies. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013: 102-108.
- [9] DU P, Hamdulla A. Infrared moving small-target detection using spatial-temporal local difference measure[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, **17**(10): 1817-1821.
- [10] DENG L, ZHANG J, ZHU H. Infrared moving point target detection using a spatial-temporal filter[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **95**: 122-127.
- [11] ZHAO B, XIAO S, LU H, et al. Spatial-temporal local contrast for moving point target detection in space-based infrared imaging system[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **95**: 53-60.
- [12] DENG L, ZHU H, TAO C, et al. Infrared moving point target detection based on spatial-temporal local contrast filter[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **76**: 168-173.
- [13] CHO J, JUNG Y, KIM D S, et al. Moving object detection based on optical flow estimation and a Gaussian mixture model for advanced driver assistance systems[J]. *Sensors*, 2019, **19**(14): 3217-3231.
- [14] ZHANG Y, ZHENG J, ZHANG C, et al. An effective motion object detection method using optical flow estimation under a moving camera[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*,

- 2018, **55**: 215-228.
- [15] JIAN Q, QIAN C, Wei-Xian Q. A detection algorithm for dim and small infrared target based on the optical flow estimation and the adaptive background suppression[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 476-482.
- [16] Shin J, Kim H, Kim D, et al. Fast and robust object tracking using tracking failure detection in kernelized correlation filter[J]. *Applied Sciences*, 2020, **10**(2): 713-727.
- [17] YU T, MO B, LIU F, et al. Robust thermal infrared object tracking with continuous correlation filters and adaptive feature fusion[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, **98**: 69-81.
- [18] Uzkent B, Rangnekar A, Hoffman M J. Tracking in aerial hyperspectral videos using deep kernelized correlation filters[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, **57**(1): 449-461.
- [19] YUAN D, ZHANG X, LIU J, et al. A multiple feature fused model for visual object tracking via correlation filters[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, **78**(19): 27271-27290.
- [20] MENG Y, MA C, AN W. Infrared object tracking method based on kernel correlation filters[C]//*Journal of Physics: Conference Series*, 2021, **2035**(1): 012038.
- [21] YANG X, LI S, YU J, et al. GF-KCF: Aerial infrared target tracking algorithm based on kernel correlation filters under complex interference environment[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, **119**: 103958.
- [22] Hsieh T H, CHOU C L, LAN Y P, et al. Fast and robust infrared image small target detection based on the convolution of layered gradient Kernel[J]. *IEEE Access*, 2021, **9**: 94889-94900.
- [23] LI Y, ZHANG Y. Robust infrared small target detection using local steering kernel reconstruction[J]. *Pattern Recognition*, 2018, **77**: 113-125.
- [24] Henriques J F, Rui C, Martins P, et al. High-speed tracking with kernelized correlation filters[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2015, **37**(3): 583-596.
- [25] 杜文汉, 李东兴, 王倩楠, 等. 融合改进帧差和边缘提取算法的运动目标检测[J]. 科学技术与工程, 2022, **22**(5): 1944-1949.
- [26] DU W H, LI D X, WANG Q N, et al. Moving target detection based on improved frame difference and edge extraction algorithm[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, **22**(5): 1944-1949.
- [27] LIU S, LIU D, Srivastava G, et al. Overview and methods of correlation filter algorithms in object tracking[J]. *Complex & Intelligent Systems*, 2020(3): 1895-1917.
- [28] WEI Y, YOU X, LI H. Multiscale patch-based contrast measure for small infrared target detection[J]. *Pattern Recognition*, 2016, **58**: 216-226.
- [29] HAN J, LIANG K, ZHOU B, et al. Infrared small target detection utilizing the multiscale relative local contrast measure[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, **15**(4): 612-616.
- [30] YU T, MO B, LIU F, et al. Robust thermal infrared object tracking with continuous correlation filters and adaptive feature fusion[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, **98**: 69-81.