

文章编号: 1001 - 9014(2008)02 - 0095 - 06

红外弱小运动目标实时检测的规整化滤波方法

张必银, 张天序, 桑农, 张坤

(华中科技大学 图像识别与人工智能研究所多谱信息处理技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 低信噪比小目标检测能力决定着系统的探测灵敏度和作用距离, 是反映红外低可观测目标识别能力至关重要的一项核心技术。自适应杂波背景抑制技术是实现这一目标的有效途径。本文将杂波背景抑制滤波归纳为逆问题求解的优化问题; 建立了新的红外弱小目标/背景模型, 在此基础上发展了一种基于规整化技术的滤波框架; 并提出了“去杂波保目标”规整化的自适应各向异性滤波新算法。详细的理论分析和试验结果表明: 该算法能在单步处理中消除杂波背景, 同时增强弱小目标信号, 运算量小; 对低信噪比的强杂波背景表现出良好的滤波性能和适应能力, 且结构简单、利于硬件实时实现。

关键词: 小目标检测; 自适应滤波; 红外图像; 规整化; 优化问题

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A

NOVEL REGULARIZING FILTERING METHOD FOR REAL-TIME DETECTING IRDM SMALL MOVING TARGET

ZHANG Bi-Yin, ZHANG Tian-Xu, SANG Nong, ZHANG Kun

(Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, National Laboratory for Multispectral Information Processing Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The performances of detecting small targets at low signal-to-noise ratio (SNR) decide the detection sensitivity and effective ranging of a system. It is a leading key technique to indicate the ability of recognizing low-observable target in infrared (IR) imagery. Adaptive background estimation method is an efficient avenue to complete this task. In this study the clutter background prediction method was reduced to the optimization problems of inverse problem. New models of target/background in IR images were established, based on which a new filtering framework using regularization technology was presented, and then a novel anisotropic filtering method with the clutter-removal target-preserving regularization was proposed. Detailed theoretical analyses and experimental results show that this method can remove the clutter background and simultaneously enhance the signal of interest in one processing step, and its computing complexity is very little; and it can also provide good filtering results and adaptability to IR targets with strong clutter background; moreover, its logical structure is simple to be implemented in real-time system.

Key words: small target detection; adaptive filtering; IR image; regularization; optimizing problem

引言

红外弱小运动目标检测是红外搜索与跟踪、红外预警等系统的一项核心技术, 一直是该领域的研究热点和难点。常常采用时域/空域/频域等滤波器预测背景、抑制杂波、突出潜在的目标区域、增强信噪比, 提高检测概率^[1-3]。Reed 等人提出了局部均值滤波 (LMR) 的非平稳背景中的目标检测算法^[1]。熊辉等在文献 [2] 中研究了使用小波变换和形态学膨胀检测在帧间作快速运动的小目标的方法。杨磊

等提出了一种自适应调整检测阈值的高通滤波检测方法^[3], 能适应海杂波复杂背景的变化。朱红等发展了基于最小均方误差的空间背景自适应预测滤波算法^[4]。武斌给出了基于三阶累积的红外弱小运动目标检测新方法^[5]。

这些常见的红外目标检测方法, 满足了该领域的一些需求。然而, 随着应用的发展, 超大视场 (大于 1000 × 1000 像元) 的、远距离的弱小运动目标的快速检测技术, 成为新的迫切需求。上述算法中经典的 LMR 滤波虽然结构简单但对强杂波适应性不强

收稿日期: 2006 - 12 - 19, 修回日期: 2007 - 05 - 12

基金项目: 国家自然科学基金重点 (60135020) 资助项目

作者简介: 张必银 (1977-), 男, 湖北随州人, 博士研究生, 主要研究模式识别、目标检测识别与评价等。

Received date: 2006 - 12 - 19, revised date: 2007 - 05 - 12

[1],其它算法需要小波变换[2]、频域变换[3]、边缘提取[4]或高阶矩计算[5]等,使得算法结构复杂、存储空间和计算量大,难以满足实时处理要求。因此,必须研究运算量小、性能高、利于硬件实现的实时检测跟踪算法,特别是大视场、复杂条件下检测与跟踪算法,以提高成像跟踪系统作用距离和探测能力。为此,本文建立了弱小目标/背景的特性模型,提出了采用“去杂波保目标”规整化的各向异性自适应滤波算法(RegAF)。理论分析和实践证明这是一种实用和有效的红外弱小目标检测方法。

1 弱小目标/背景的成像模型

提出一阶邻域空间分布模型,分析红外弱小目标建模技术。用于从理论上分析弱小目标检测技术、提出新算法 RegAF,并评估其信号响应特性。

1.1 红外弱小目标场景的成像模型

红外弱小目标场景图像可以认为是由目标、背景和噪声三部分组成,数学模型(记为 Model-D)表示为

$$f(i, j) = b(i, j) + t(i, j) + n(i, j), \quad (1)$$

其中 (i, j) 表示图像中像素点坐标; $f(i, j)$ 表示红外图像的灰度值; $b(i, j)$ 表示背景图像的灰度值; $t(i, j)$ 表示弱小目标的灰度值; $n(i, j)$ 表示噪声图像的灰度值。下文新建的模型分析了这种常用模型中各信号的特性。

1.2 红外弱小目标/背景/噪声的灰度分布模型

不失一般性,可以假设目标 $t(i, j)$ 、噪声 $n(i, j)$ 以及背景干扰 $b(i, j)$ 分别近似看作是二维平面上不同长/宽/高的立方体函数。一个标准的立方体函数 $\tau_0(j, k)$ 可如下描述:

$$\tau_0(j, k) = \begin{cases} 1, & |j| \leq T_j, |k| \leq T_k \\ 0 & \text{其它} \end{cases}, \quad (2)$$

式中, $2T_j$ 和 $2T_k$ 是立方体函数支撑域的长和宽。任何在 $x-y$ 平面的立方体函数 $\tau_{x,y}(j, k)$ 可以表示为

$$\tau_{x,y}(j, k) = f(x, y) \tau_0(x - j, y - k), \quad (3)$$

是支撑域大小的膨胀系数, $f(x, y)$ 是灰度的膨胀系数。

对于一幅红外图像来说,在不考虑目标、噪声和背景之间相对位置时,它们之间的灰度分布一般可以抽象为如图 1(a)所示,记为 Model-I 图中, G_n , G_t , G_b 分别为噪声、目标以及背景的灰度值。 $2T_n$, $2T_t$, $2T_b$ 分别为噪声、目标和背景的覆盖范围。 C_n , C_t , C_b 分别为噪声、目标和背景覆盖范围的中心位置。随着灰度值、覆盖范围和覆盖范围中心位置的变

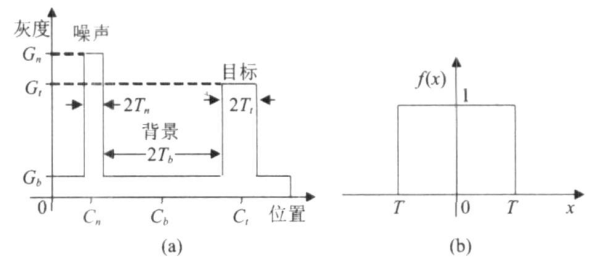


图 1 目标/背景/噪声的灰度分布模型 (a) 目标、背景和噪声理想模型的一维剖面 (b) 窗函数

Fig 1 Grayscale distribution model of target, background, noise (a) the 1D section plane of target, background and noise model (b) window function abstracted from the model

化,噪声、目标和背景都可以简单抽象为图 1(b)所示的门函数。

一般地,目标灰度 $t(i, j)$ 通常比背景要亮,但其灰度与一些强噪声点相差不大。背景图像 $b(i, j)$ 通常具有较长的相关长度,占据了场景图像 $f(i, j)$ 空间频率的低频部分。同时,由于场景和传感器内部热分布的不均匀性,背景图像 $b(i, j)$ 一般是 1 个非平稳过程,图像中局部灰度值可能有较大的变化。 $b(i, j)$ 中也包含部分高频分量,主要分布在背景图像各个同质区的边缘处。噪声图像 $n(i, j)$ 主要是探测器的内部噪声和外部噪声,与背景像素不相关,空间分布是随机的,没有帧间相关性。这种模型可作为空域滤波模板尺寸选择及频域滤波分析的依据。各信号之间的空间位置关系由下文的空间分布模型来说明。

1.3 红外弱小目标图像的一阶邻域空间分布模型

距离较远的红外弱小目标一般呈斑点目标,其尺寸为 $1 \times 1 \sim 3 \times 3$ 个像素,此时目标无形状特征。将 Model-I 扩展到二维平面,并根据信号的覆盖位置及其中心的空间分布,可以建立一阶邻域空间分布模型(记为 Model-I'),如图 2 所示,其中,白色和黑色方块分别代表高、低不同灰度值的像元。位置 (i, j) 的一阶邻域有 4 个像元,这里的“像元”代表 1 个像素或抽样的 $2 \times 2 \sim 3 \times 3$ 大小的像素簇。根据信号的空间位置及灰度值关系,1 个像元和其它各元的相关性可以归纳为图中的八种基本类型(a-h),每个模型代表了平面内任意旋转角的其他类型。中心像元 (i, j) 可归类为背景、角点、边缘、边界、纹理、噪声、目标点、及界于它们之间的各类疑似点。

2 规整化的各向异性自适应滤波弱小目标检测算法(RegAF)

考虑到在含有弱小目标红外图像中,目标在图

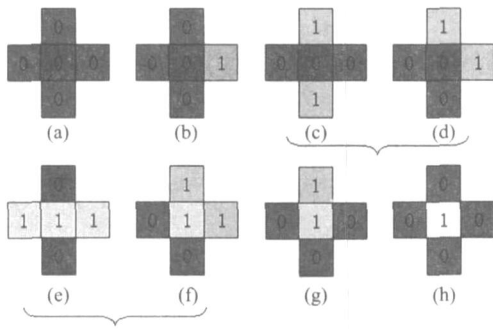


图 2 红外目标/背景/噪声的一阶邻域空间分布模型. 中心像素可归纳为: (a - b)为背景; (e - f)为边缘、边界或角点; (c - d)的性质界于(a - b)于(e - f)之间; (h)为目标点或强噪声; (g)的性质界于(e - f)和(h)之间

Fig 2 The 1-rank adjacent space distribution model of R target/background/noise. The center pixel can be classified as that (a - b) is background; (e - f) is edge, boundary or corner; (c - d) is among (a - b) and (e - f); (h) is target or strong noise; (g) is among (e - f) and (h)

像中所占的尺寸非常小,而绝大部分图像属于背景杂波,以及实时性的要求,提出了采用结构简单的单帧局部自适应滤波方法,下文给出了推导过程及性能分析.

2.1 基于背景预测的滤波方法及其非良态性分析

根据 Model- 和 ,常见的基于背景预测的红外弱小目标检测流程如图 3所示. 基本思想是:选择合适的背景预测算子 H 对输入图 f 进行背景预测,获取真实背景 b 的估计 g ,然后去减 f 就得到杂波抑制后的残差图像 (含有红外弱小目标和噪声).

迄今为止,已经发展了很多这类方法,具体包括二维最小均方滤波、空间高通滤波、空间匹配滤波、中值滤波、数学形态学滤波、基于 Max-Min滤波、基于非线性滤波、以及基于小波变换的滤波等. 该滤波模型可抽象为

$$\begin{cases} \epsilon = f - g \\ g = Hf \end{cases} \quad (4)$$

然而,由于成像平台的抖动和非平稳背景杂波,观测图像常常受边缘、纹理、边角点以及探测器的强噪声等杂波的干扰,使得 H 难以有效预测背景,导致 ϵ 仍然包含背景杂波,为后续处理带来很大困难.

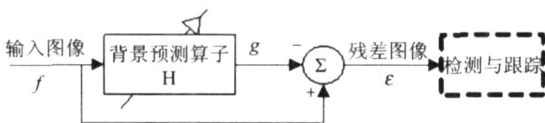


图 3 基于背景预测的杂波抑制方法处理流程
Fig 3 The clutter suppression processing framework based on background prediction

事实上,上述的从 f 中估计真实背景 b 的过程,可归纳为逆/反问题求解的优化问题. 在缺少丰富先验知识的条件下,对复杂场景真实背景的求解不是唯一的,是一个非良态问题或不适问题 (ill-posed problem),需要对式 (4)进行物理约束. 因此,可利用先验知识对问题增加更多的约束,使问题的解在真解的邻域中连续地依赖于观测数据,并且在物理上有意义. 实现这种想法的技术通称为规整化^[6]. 这是本算法理论的出发点.

2.2 弱小目标检测的规整化滤波算法框架

根据 Model- ,可以将式 (4)看作是从含有噪声 n (由 Model- 可知,可将小目标暂时归为噪声一类)的观测数据 f 中重建未知的原始数据 g 的过程. 这是图像处理领域常见的逆反问题,例如图像恢复和重建,需要进行规整化. 采用从所有可能的 g 中寻找一个 g 使得下列的准则函数最小化^[6,7]

$$J(g) = \frac{1}{2} \|g - Hf\|^2 + \frac{\lambda}{2} J_2 \quad (5)$$

$$J_2 = \int \phi(f) dx \quad (6)$$

其中, λ 是非负的规整化系数,起着平衡式 (5)中两项的作用; J_2 是规整化范函,用于约束求解过程; ϕ (ϕ)是势函数,在不同的应用中具有不同的规整化形式. 最成功应用是“边缘保留”(edge-preserving)规整化,广泛应用于边缘检测、去噪、图像恢复和重建等方面. 又以 Perona-Malik 扩散模型 (PM 模型)^[7]最具代表性,实质上是改进的热传导方程,即

$$\text{div}[d(|\nabla I|) \nabla I] \quad (7)$$

其中, I 是原始图像, div 和 ∇ 分别表示散度算子和梯度算子, $d(\cdot)$ 描述扩散系数、是关于梯度的函数. 保边缘规整化要求势函数是单调降函数且满足当梯度 $|\nabla I| \rightarrow 0$ 时 $d(|\nabla I|) = 0$,从而达到停止对边缘扩散的目的. 常用的两种函数是

$$\begin{aligned} d(t) &= 1 / \{1 + (t/k)^2\}, \\ \text{或 } d(t) &= \exp\{- (t/k)^2\}. \quad k > 0 \end{aligned} \quad (8)$$

类似的,为限制在估计背景时容易造成的过分平滑或给残差图像带来过多的杂波噪声,可以选择合适的势函数 $\phi(|\nabla|)$ 约束滤波过程,发展新的规整化项

$$J = \int \phi(f) dx \quad (9)$$

式 (5)和式 (9)构成了基于背景预测的小目标检测的规整化滤波框架.

2.3 规整化滤波 RegAF及其基本条件

首先分析规整化项 J 对象素 $u(i, j)$ 的平滑性

影响, J 的范函形式是

$$J(u) = \int (u_x, u_y) dx dy, \quad (10)$$

记 $u(i, j)$ 的一阶四邻域为 D_u , 上式的离散化形式是

$$J(u) = \sum_{i,j \in D_u} [(D_{ij}^x(u)) + (D_{ij}^y(u))] \quad (11)$$

其中 $D_{ij}^x(u) = (u_{i+1,j} - u_{i,j}), D_{ij}^y(u) = (u_{i,j+1} - u_{i,j})$ 是一阶差分. 求偏导数

$$\begin{aligned} \partial J / \partial u_{i,j} &= \frac{\partial}{\partial u_{i,j}} [(u_{i+1,j} - u_{i,j}) + (u_{i,j} - u_{i,j-1}) \\ &+ (u_{i+1,j} - u_{i,j}) + (u_{i,j} - u_{i-1,j})] \\ &= -(u_{i+1,j} - u_{i,j}) + (u_{i,j} - u_{i,j-1}) \\ &- (u_{i+1,j} - u_{i,j}) + (u_{i,j} - u_{i-1,j}), \quad (12) \end{aligned}$$

令 $c(t) = (t) / 2t$, 则 $(t) = 2t * c(t)$, 上式等价于

$$\partial J / \partial u_{i,j} = -2\{E u_{i+1,j} + W u_{i,j-1} + S u_{i+1,j} + N u_{i-1,j} - u_{i,j}\}, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} E &= c(u_{i+1,j} - u_{i,j}), \quad W = c(u_{i,j-1} - u_{i,j}), \\ S &= c(u_{i+1,j} - u_{i,j}), \quad N = c(u_{i-1,j} - u_{i,j}), \quad (14) \end{aligned}$$

即规整化项对点 (i, j) 的平滑性影响是

$$H(i, j) = \begin{bmatrix} 0 & -N & 0 \\ -W & - & -E \\ 0 & -S & 0 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\hat{u}(i, j) = H(i, j) \cdot \begin{bmatrix} 0 & u_{i-1,j} & 0 \\ u_{i,j-1} & u_{i,j} & u_{i,j+1} \\ 0 & u_{i+1,j} & 0 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

其中, \cdot 代表点乘. 整幅图像的滤波结果 \hat{u} 等价于原始图像 u 与局部自适应算子 H 的卷积.

根据 Model- 、 , 红外弱小点目标是图像中的孤立奇异点, 而其奇异性与边缘构成的奇异性的差别, 在于后者构成的奇异性具有空间相干性. 弱点目标检测实质是分离背景与目标的不同奇异性特征. 据此, 对势函数提出如下条件, 即 $\exists (t)$, 使得 $c(t) = (t) / 2t$ 满足:

$\lim_{t \rightarrow 0} c(t) = 0$: 在均匀平稳区域进行各向同性平滑而消除背景;

$\lim_{t \rightarrow +\infty} c(t) = M, M \in (0, +\infty)$: 各向异性平滑边缘以抑制纹理杂波背景、增强目标;

$c(t)$ 是连续严格单调增函数, $t \in [0, +\infty)$, 保证滤波稳定性.

满足这三大条件的势函数, 例如式 (17 ~ 19), 可以将式 (4) “分两步走” 的背景抑制方法合并到式 (16), 从而在单步处理中去除背景杂波和增强感兴趣的目标信号.

$$c(t) = 1 - 1/[1 + (t/k)^2], \quad (17)$$

$$c(t) = 1 - \exp[-(t/k)^2], \quad (18)$$

$$c(t) = 1 - 1/\sqrt{1 + (t/k)^2}. \quad (19)$$

2.4 规整化滤波器 RegAF的信号响应特性

现在分析式 (15) 中的 $c(t)$ 在条件 ~ 约束下 H 的信号反应特性.

(1) 第一类是平稳均匀区域: 表现为 Model- 中占有具有较长的相关长度的背景、属于 Model- 的类型 (a - b). 此时, 梯度 t_d 均接近 0 ($d \in D_u$, 梯度取式 (13) 中差分的绝对值, 下同). 由条件 知, $H(i, j)$ 系数均接近 0, 如图 4(a) 所示. 此时, u_i 将作为背景而被抑制或消除.

(2) 另一类情况是边缘纹理 (例如水平微边) 经过 $u_{i,j}$: 属于 Model- 的类型 (c - f). 则 4 个方向的梯度 e_d 中至少有 2 个接近 0, 图 4(b) 列举了出现 Model- 的类型 (e) 的 $H(i, j)$. 可知该类信号将被视为纹理和结构而遭到平滑和抑制.

(3) 考虑有灰度奇异点出现在 $u_{i,j}$: 表现为 Model- 中的高频的信号或强噪声、属于 Model- 的类型 (g - h), 则所有的梯度 $t_d \gg 0$, 由条件 存在 $\lim_{t_d \gg 0} c(t_d) = m_d, H(i, j)$ 如图 4(c) 所示, 由条件 知, 这是一个随梯度单调递增函数. 已知红外弱小目标一般如 Model- 中的孤立奇异点、具有近似高斯分布, 因此 $u_{i,j}$ 将被明显增强.

由此得知, H 是局部自适应加权滤波器, 覆盖了 Model- 、 、 中的所有情况. 与传统的基于背景抑制的目标检测算法相比, 它具有双重作用: 在小梯度值的均匀区域, H 作为各向同性的滤波器抑制和消除平稳的背景; 在大梯度的非均匀区域, 它变成各向异性的选择性的滤波器——更多地平滑结构背景, 同时增强感兴趣的目标信号. 简而言之, 它在单步处理中消除或抑制杂波背景同时增强目标信号. 因此, 对滤波过程施加的这样一种约束称之为“保目标 去杂波 规整化”.

$$\lim_{\epsilon_d \rightarrow 0} H(\epsilon_d) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad H(\pi_i) = \begin{bmatrix} 0 & -m_n & 0 \\ 0 & \sum m_d & 0 \\ 0 & -m_s & 0 \end{bmatrix} \quad \lim_{t_d \gg 0} H(t_d) = \begin{bmatrix} 0 & -m_n & 0 \\ -m_w & \sum m_d & -m_e \\ 0 & -m_s & 0 \end{bmatrix}$$

(a) (b) (c)

图 4 不同杂波情况下的滤波器算子 (a) 平稳均匀区 (b) 非均匀“微边”区 (c) 灰度奇异点区

Fig 4 The adaptive filtering operators in different clutter conditions (a) the stationary homogeneous area (b) the nonstationary area with an edge or structure (c) the grayscale value singularity point area

2.5 规整化滤波小目标检测的后续处理

RegAF算法应用式(15,16)计算 H ,并与原始图 u 卷积得到滤波结果 h 得到的 h 主要是明显增强的目标信号和少许较强的噪声.这种首先检测每帧图像中候选目标的方法,称为单帧预检测.接着,还可以使用多帧累积、自相关、时间预测或轨迹滤波等理论方法来进一步抑制噪声.最后,可以选用管道滤波、Hough变化和跟踪匹配等算法估计目标轨迹.由于篇幅限制,下文仅评价了滤波效果,未考虑后续的处理.

3 试验结果与评价

3.1 性能评价测度

为评估不同滤波器的目标保留和背景抑制能力,定义了2个指标:信噪比增益(ISC_R)通过比较杂波抑制前后的SCR衡量目标保留能力;背景抑制因子(BSF)测量背景结构的去除能力.

$$SCR = (\mu_{bt} - \mu_b) / \sigma_c, \quad (20)$$

$$ISC_R = SCR_{out} / SCR_{in}, \quad (21)$$

$$BSF = \sigma_{in} / \sigma_{out}, \quad (22)$$

其中, μ_b 是目标峰值, μ_b 是目标邻域灰度均值, σ_c 背景的标准差, σ_{in} 和 σ_{out} 分别是滤波前后图像的标准差.

3.2 单帧红外小目标检测试验

我们将提出的RegAF算法与改进的Wiener算法^[8]和LMR^[11]算法的作性能分析.选择的理由是Wiener算法对复杂背景有很好的适应能力,LMR为迄今结构最简单且对平稳背景抑制能力强.从红外序列中选取轻度、中度、重度三种杂波背景进行处理.图5给出了它们的滤波结果,性能数据记录在表1中.可以看出,RegAF维持了比Wiener,LMR更好的性能,特别在强纹理杂波情况下,例如如图5(B1、C1),背景抑制(如边缘、纹理等)和目标增强能力比另两个算法要好得多,计算速度(ETS)比Wiener快的多、接近于LMR.

3.3 红外序列图像小目标检测试验

我们还用真实红外背景合成图像序列评估检测效果.这个序列包括36帧,目标大小约为 $1 \times 1 \sim 2$

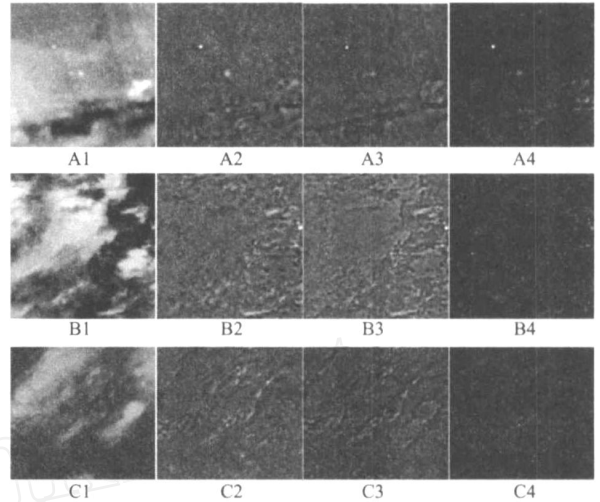


图5 原始图像和不同算法的滤波结果. A1, B1, C1: 不同杂波的原图像; A2, B2, C2: Wiener的滤波结果; A3, B3, C3: LMR的滤波结果; A4, B4, C4: RegAF的滤波结果

Fig 5 The original R images and filtered results by different algorithms A1, B1, C1: different cluttered images; A2, B2, C2: Wiener's filtered results; A3, B3, C3: LMR's results; A4, B4, C4: RegAF's Results

$\times 2$,点扩展大小为 $3 \times 3 \sim 5 \times 5$,叠加能量的标准差是19.730(参见图7(a)中 SCR_{in} 变化曲线),移动速度约为 $2 \sim 5$ 象素/帧,相机平面的抖动范围是 $0 \sim 0.5$ 个象素.为了性能的直观比较,每帧滤波结果的各位位置象素的极大值在时间轴上作了投影,图6是滤波和分割结果;图7给出了每帧的性能曲线.

以上2个试验结果表明RegAF算法能很好地抑制杂波和增强目标,与理论分析完全一致.

4 结论与展望

大视场复杂环境下小目标的实时检测是红外小目标检测领域中一个极富挑战性意义的课题.为此本文提出了一种新的快速算法.通过建立红外图像信号组成、灰度分布及空间位置的数学模型,创造性地将逆/反问题的求解优化技术引入到小目标检测领域,由此提出基于规整化理论的滤波框架,发展了基于“杂波抑制-目标增强-规整化”的滤波算法,并从理论上分析了该算法的信号响应特性.与一般滤波

表1 不同杂波情况下算法性能的比较

Table 1 The performance comparisons of the algorithms in different clutter

Images	Filters		Wiener			LMR			RegAF		
	Tsize	SCR _{in}	ISC _R	BSF	EST (s)	ISC _R	BSF	EST (s)	ISC _R	BSF	EST (s)
A1	3 3	1.515	7.781	2.926	0.040	9.203	2.954	0.010	10.967	3.156	0.012
B1	2 2	0.985	1.414	3.084	0.045	1.550	2.931	0.010	2.688	4.467	0.012
C1	1 1	1.560	6.900	2.402	0.040	6.908	2.105	0.010	16.521	3.476	0.012

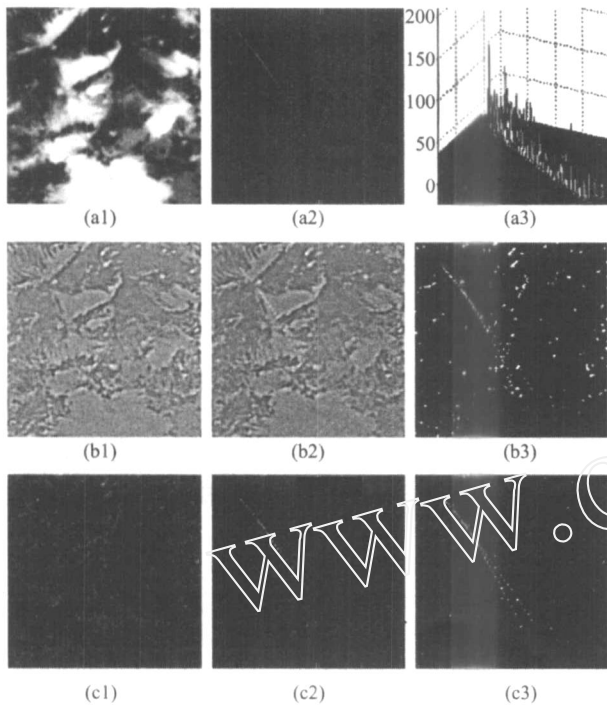


图 6 RegAF和 LMR算法的性能比较 (a1)序列的第一帧 (a2)叠加的目标轨迹 (a3)a2的三维效果图 (b1)LMR第一帧滤波结果 (b2)LMR滤波结果在时间轴上投影 (b3)对(b2)的分割(门限 = 180) (c1)RegAF第一帧滤波结果 (c2)RegAF滤波结果在时间轴上投影 (c3)对(c2)的分割(门限 = 90)

Fig 6 Performance comparison of LMR and the proposed RegAF (a1) the first frame of the image sequence (a2) the added target trajectory (a3) The 3D view of (a2) (b1) the first frame of the LMR's filtered results (b2) the results of LMR's filtered results projecting on t-coordinate (b3) segmented result of (b2), the segmenting threshold equals to 180 (c1) the first frame of RegAF's filtered results (c2) the results of RegAF's filtered results projecting on t-coordinate (c3) segmented result of (c2) the segmenting threshold equals to 90

器的不同之处是:它能局部自适应地区分、选择性地抑制或增强信号.详细的理论分析和试验结果表明,对远距离、大视场的云层纹理杂波背景的点源红外弱小目标,该算法具备良好检测能力和稳健的适应性,且运算量小、结构简单、利于硬件并行实现,具有良好的应用前景.

REFERENCES

- [1] Chen J Y, Reed I S. A detection algorithm for optical targets in clutter[J]. *IEEE Trans on aerospace and electronic Sys*, 1987, **23**(1): 46—591.
- [2] X DNG Hui, SHEN Zhen-Kang, WEI Ji-Bo, et al. Moving infrared low SNR target detection algorithm [J]. *ACTA Electronica Sinica* (熊辉, 沈振康, 魏急波, 等. 低信噪比运

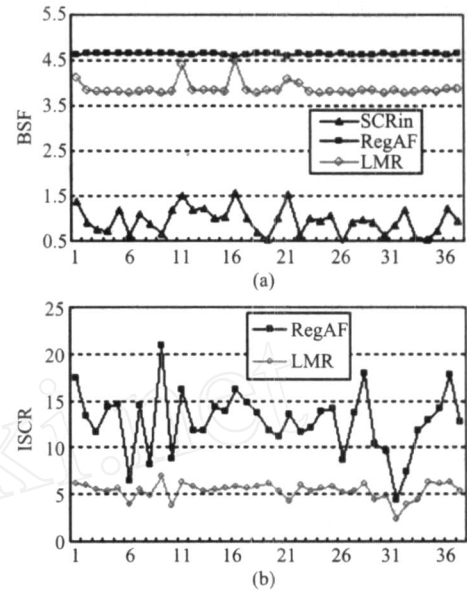


图 7 序列图像处理中算法性能的比较 (a)序列中每帧的 SCRin、LMR和 RegAF的 BSF (b)序列中每帧的 LMR和 RegAF的 ISCR

Fig 7 The algorithm's performance analysis in sequence processing (a) the SCRin, and LMR's and RegAF's BSF in every frame of the image sequence (b) the LMR's and RegAF's ISCR in every frame of the image sequence

- 动红外点目标的检测. *电子学报*), 1999, **27**(12): 26—29.
- [3] YANG Lei, YANG Jie, ZHENG Zhong-Long. Real-time method for detecting multi-small targets in infrared large sight field [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨磊, 杨杰, 郑忠龙. 海空复杂背景中基于自适应局部能量阈值的红外小目标检测. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(1): 41—45.
- [4] ZHU Hong, ZHAO Yi-Gong. Detection of weak and small moving infrared targets by adaptive prediction of background [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (朱红, 赵亦工. 基于背景自适应预测的红外弱小运动目标检测. *红外与毫米波学报*), 1999, **18**(4): 305—310.
- [5] JWU Bin, JI Hong-Bing, LI Peng. New method for moving dim target detection based on third-order cumulant in infrared image [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (武斌, 姬红兵, 李红. 基于三阶累积的红外弱小运动目标检测新方法. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(5): 364—367.
- [6] ZOU Mou-Yan. *Deconvolution and Signal Recovery* [M]. Beijing: National Defence Industry Press (邹谋炎. 反卷积和信号恢复. 北京: 国防工业出版社), 2001: 242—257.
- [7] Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 1990, **12**(7): 629—639.
- [8] Lin J N, Nie X, Unbehauen R. Two-Dimensional LMS adaptive filter incorporating a local-mean estimator for image processing [J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems: Analog and Digital Signal Processing*, 1993, **40**(7): 417—428.