

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **10**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年10月 第17卷 第10期(总第198期)

目次

综述

张量值图像插值方法综述 邵宇, 刘莹, 孙富春(1197)

图像处理和编码

利用模运算及其周期性特点的安全隐写算法 廖琪男(1206)

结合快速融合与颜色传递的双波段夜视图像染色 李郁峰, 冯晓云, 徐铭蔚, 黄文丽(1213)

Weber 定律下尺度空间的自适应构建 刘立, 张瑞军, 万亚平, 黄欣阳, 彭复员(1222)

改进权值函数的非局部均值去噪算法 单建华(1227)

图像分析和识别

非相似度保持投影 陈才扣, 侯钰(1232)

非正交二值子空间模板表示的并行生成 杨培, 武港山, 杨扬, 任桐炜(1237)

Adaboost 和随机图划分的无监督图像分类 李巍, 杨素锦, 段晓华(1245)

aiNet 背景抑制的单帧红外弱小目标检测 陈炳文, 王文伟, 秦前清(1252)

韦伯-中心环绕结构的图像显著性检测模型 林丽莉, 周文晖(1261)

气象传真图信息提取 李存东, 肖传毅, 潘海朗, 陈日清, 杨劲松(1268)

图像理解和计算机视觉

多要素空间场景相似性匹配模型及应用 宋腾义, 汪闽(1274)

计算机图形学

Delaunay 三角网通用合并算子及分治算法的简化 刘永和, 冯锦明, 郭维栋, 田根, 金毅(1283)

基于 Laplace 谱嵌入和 Mean Shift 的三角网格一致性分割 马亚奇, 李忠科, 赵静(1292)
 断裂面匹配的破碎刚体复原 李群辉, 周明全, 耿国华(1298)

虚拟现实与增强现实

核爆炸外观景象实时模拟 郑涛, 徐晓刚, 邵承永(1305)

医学图像处理

全局脑白质纤维群智能跟踪算法 冯远静, 王哲进, 张贵军, 俞立(1312)

遥感图像处理

对偶四元数线阵遥感影像几何定位 盛庆红, 姬亭, 刘微微, 王惠南(1319)

修正安装矩阵提高 FY-3B/MERSI 的地理定位精度 吴荣华, 杨忠东, 关敏, 李翔翔(1327)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 10 期

2012 年 10 月 16 日出版

主管单位 中国科学院
主 办 中国科学院遥感应用研究所
 中国图象图形学学会
 北京应用物理与计算数学研究所
主 编 李小文
编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
 北京 9718 信箱 邮编 100101
 电子信箱:jig@irsa.ac.cn
 电话:010-64807995 010-82614429
 网 址:www.cjig.cn
印刷装订 北京北林印刷厂
广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
 (中国国际书店)
 (北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
 CAS China Society of Image and Graphics
 Institute of Applied Physics and Computational
 Mathematics
Chief editor LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
 of Journal of Image and Graphics
 (P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
 E-mail:jig@irsa.ac.cn
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
 and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading Corporation
 (P. O. Box 399, Beijing 100044, China)
Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 10 October 2012

Contents

Review

Overview of tensor valued images interpolation technology Shao Yu, Liu Ying, Sun Fuchun (1197)

Image Processing and Coding

Secure steganography based on modulo and its cyclical characteristic Liao Qinan (1206)

Night vision dual-band images coloration using fast fusion and color transfer
..... Li Yufeng, Feng Xiaoyun, Xu Mingwei, Huang Wenli (1213)

Adaptive algorithm of scale-space construction method based on Weber's law
..... Liu Li, Zhang Ruijun, Wan Yaping, Huang Xinyang, Peng Fuyuan (1222)

Non-local means denoising algorithm with enhanced weight function Shan Jianhua (1227)

Image Analysis and Recognition

Dissimilarity preserving projection Chen Caikou, Hou Yu (1232)

Parallel algorithm for generating template representation based on non-orthogonal binary subspace
..... Yang Pei, Wu Gangshan, Yang Yang, Ren Tongwei (1237)

Unsupervised image categorization based on Adaboost and stochastic graph partition Li Wei, Yang Sujin, Duan Xiaohua (1245)

Infrared dim target detection in single image based on background suppression by aiNet
..... Chen Bingwen, Wang Wenwei, Qin Qianqing (1252)

Image saliency detection model with Weber's law based on center-surround structure Lin Lili, Zhou Wenhui (1261)

Information extraction from meteorological facsimile maps
..... Li Cundong, Xiao Chuanyi, Pan Hailang, Chen Riqing, Yang Jinsong (1268)

Image Understanding and Computer Vision

Multi-feature based spatial scene matching model and its application Song Tengyi, Wang Min (1274)

Computer Graphics

Merging planar Delaunay triangulations based on universal operators and the implementation of a divide-conquer algorithm
..... Liu Yonghe, Feng Jinming, Guo Weidong, Tian Gen, Jin Yi (1283)

Consistence segmentation of triangle mesh using Laplace spectral embedding and Mean Shift
..... Ma Yaqi, Li Zhongke, Zhao Jing (1292)

Reassembly of broken 3D solids based on fractured surfaces matching Li Qunhui, Zhou Mingquan, Geng Guohua (1298)

Virtual Reality and Augmented Reality

Real-time simulation of nuclear explosion scene Zheng Tao, Xu Xiaogang, Shao Chengyong (1305)

Medical Image Processing

Global white matter tractography using swarm optimization Feng Yuanjing, Wang Zhejin, Zhang Guijun, Yu Li (1312)

Remote Sensing Image Processing

Geo-positioning line-array CCD images with dual quaternion Sheng Qinghong, Ji Ting, Liu Weiwei, Wang Huinan (1319)

Improved FY-3B/MERSI geolocation accuracy using installation matrix
..... Wu Ronghua, Yang Zhongdong, Guan Min, Li Xiangxiang (1327)

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)10-1252-09

论文引用格式: 陈炳文, 王文伟, 秦前清. aiNet 背景抑制的单帧红外弱小目标检测[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(10): 1252-1260.

aiNet 背景抑制的单帧红外弱小目标检测

陈炳文¹, 王文伟¹, 秦前清²

1. 武汉大学电子信息学院, 武汉 430079; 2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079

摘要: 针对现有背景抑制算法未能有效抑制背景而导致目标检测率低的问题, 提出了一种基于人工免疫网络(aiNet)进行背景抑制、基于行列k均值聚类实现阈值分割的单帧红外弱小目标检测算法。首先采用aiNet结合Robinson警戒环技术, 融入自组织特征映射(SOM)拓扑思想, 设计一系列抗体进化策略, 建立自适应局部空间背景模型—模糊拓扑记忆抗体库, 并以此分析各像素点的背景模糊隶属度来抑制背景杂波; 接着提出基于行列k均值聚类的阈值分割算法来检测真实目标。实验结果表明, 该算法的F1指标高达99%, 其能随背景的局部变化来自适应建立空间背景模型, 从而自适应抑制背景杂波突显目标, 能有效提高信噪比检测弱小目标。

关键词: 弱小目标检测; 人工免疫网络; 自组织特征映射; Robinson警戒环; 行列k均值聚类

Infrared dim target detection in single image based on background suppression by aiNet

Chen Bingwen¹, Wang Wenwei¹, Qin Qianqing²

1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: In order to solve the problem that the current approaches cannot suppress the background clutters effectively, which results in a poor detection performance, a new infrared dim target detection approach is presented, which is based on background suppression by artificial immune network (aiNet) and threshold segmentation by k-means cluster of rows and columns. First, the aiNet is combined with Robinson guard to build the adaptive local spatial background models as fuzzy topological memory antibody bank. In the process of antibody bank modeling, a series of antibody evolution strategies are designed based on self-organizing maps (SOM). With these models, background clutters are suppressed according to the degree of fuzzy match between pixels and models. Then, the proposed adaptive segmentation algorithm based on k-means cluster of rows and columns is used to detect the true targets. Experimental results show that the F1 measurement of the proposed approach is up to 99%. The proposed approach is able to build the spatial background models adaptively according to the local change of image, and suppress the background clutters and highlight the targets effectively. It is capable of improving the signal-to-noise ratio of images and detecting targets effectively.

Key words: dim target detection; artificial immune network; self-organizing map; Robinson guard; k-means cluster of rows and columns.

收稿日期: 2011-11-11; 修回日期: 2012-03-27

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(212274467); 国家科技支撑计划项目(2011BAK08B02); 湖北省自然科学基金项目(2011CDB452)

第一作者简介: 陈炳文(1986—), 男, 武汉大学信号与信息处理专业在读博士研究生, 主要研究方向为目标检测跟踪与智能系统, 已发表学术论文9篇。Email: chen31450@163.com

0 引言

红外探测技术因其强隐蔽性和全天候的数据获取能力逐渐成为了世界各国重视的战场侦查手段,但对于远距离目标而言,其成像面积较小,且常淹没在复杂背景中,信噪比较低。如何有效地抑制复杂背景杂波的影响,是提高弱小目标检测率的关键问题。常用的背景抑制技术有小波域滤波^[1]、形态学滤波^[2]、时域滤波^[3]和空域滤波^[4]等。小波域抑制技术的重点在于小波基与分解层次的筛选;形态学抑制技术的重点则在于结构元素的选择;时域抑制技术的重点在于目标的帧间对应匹配;而空域滤波背景抑制算法则致力于鲁棒背景预测模型的研究。近年来红外背景抑制技术得到较大的发展,Lan 等人^[5]基于人工免疫学的危险理论采用监督式分类器样本学习来检测红外小目标,Gao 等人^[6]则采用免疫算法进行目标的帧间轨迹搜索,然而至今很少有文献采用或结合人工免疫算法来进行红外背景抑制。

对于红外背景而言,弱小目标的检测类似于人体免疫系统捕获排斥异类抗原的免疫机制。鉴此,基于非监督式信息建模思想,依据红外成像的空间特性,采用人工免疫网络(aiNet)来抑制背景杂波检测弱小目标。采用 3 种背景抑制评价指标和 3 种目标检测评价指标来客观评价目标检测算法的性能。

1 单帧背景抑制

1.1 人工免疫网络

aiNet 是 De Castro 构造的一种免疫网络算法,该算法模拟免疫网络对抗原的刺激过程,主要包括抗体-抗原识别、免疫克隆增殖、亲和力成熟以及网络抑制。该网络具有减少冗余和描述数据结构的功能^[7]。图 1 展示了 aiNet 的免疫学习模型,其学习算法如下^[8]:

1) 在每一次迭代中,执行以下步骤:

(1) 针对每一个抗原:

① 采用欧氏距离度量,确定其对所有网络细胞的亲和力;

② 选择前几个高亲和力的网络细胞进行克隆,并建立临时记忆细胞矩阵;

③ 清除亲和力低的细胞,并筛选临时记忆细胞矩阵;

④ 更新记忆细胞矩阵。

(2) 抑制记忆细胞矩阵。

(3) 替换最差个体。

2) 测试终止准则。

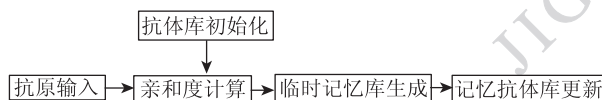


图 1 aiNet 免疫学习模型

Fig. 1 The immune learning model of aiNet

1.2 基于 aiNet 的背景抑制

在远距离被动探测条件下,红外背景呈现出较强的相关性,而与目标间相关性较差。对红外背景而言,弱小目标的检测类似于人体免疫系统捕获排斥异类抗原的免疫机制。鉴此,基于人工免疫网络,将弱小目标视为抗原、背景视为抗体,结合 Robinson 警戒环技术^[9],融入自组织特征映射(SOM)拓扑思想,设计一系列抗体进化策略,建立自适应局部空间背景模型——模糊拓扑背景记忆抗体库,通过判断当前像素点(未知抗原)的背景模糊隶属度(亲和力)来抑制背景杂波突显目标,并命名此方法为 aiNet 局部背景抑制算法(AILS)。

为了便于下文理解,定义如下概念:

目标抗原:指属于弱小目标的像素点。

背景抗原:指当前点局部邻域的背景像素点。

背景抗体:指采用背景抗原进行免疫学习后获得的抗体。

存活率:指每个背景抗体携带的一个属性,表征其生命力与活跃度。

临时背景抗体库:指在背景抗原刺激下,获胜背景抗体进行繁殖生成的抗体库。

模糊拓扑背景记忆抗体库:指采用背景抗原进行迭代免疫学习后最终生成的抗体库。

aiNet 局部背景抑制算法分为两个阶段:背景抗体库免疫学习阶段和目标抗原排斥阶段,如图 2 所示。

背景抗体库免疫学习阶段:采用 Robinson 警戒环技术,对当前像素点的邻域设置警戒环,警戒环外的邻域像素作为背景抗原进行背景抗体的免疫学习,建立模糊拓扑背景记忆抗体库。由于红外弱小目标一般呈点状结构,所以通常将警戒环设为方形结构,其尺寸一般等于或略小于目标的尺寸,而目标的尺寸大小在算法初始化时依据经验值来确定。采用警戒环技术可以避免中间点为可能的目标点而带来的干扰。

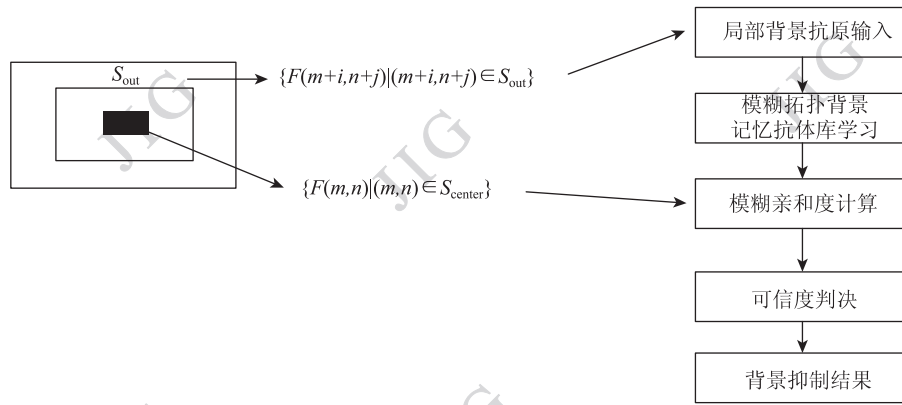


图2 aiNet 背景抑制模型

Fig. 2 The background suppression model based on aiNet

目标抗原排斥阶段:将当前像素点视为未知抗原注射到模糊拓扑背景记忆抗体网络中,刺激每个背景抗体,计算其与所有抗体的亲和力

$$D_j = \frac{|\mathbf{g} \wedge \mathbf{b}_j|^2}{|\mathbf{g}| \times |\mathbf{b}_j| + \delta}, j = 1, \dots, J \quad (1)$$

采用模糊相似度量来衡量抗原-抗体的亲和力,并对输入抗原进行了归一化取补

$$\mathbf{g} = [\mathbf{F}(m, n), \mathbf{F}(m, n)^c] \quad (2)$$

$$\mathbf{F}(m, n)^c = 1 - \mathbf{F}(m, n)$$

接着选取最高亲和力的抗体,获得当前像素点(未知抗原)的背景模糊隶属度

$$P(m, n) = \max\{D_j | j = 1, \dots, J\} \quad (3)$$

进行可信度判决得到背景杂波抑制结果

$$E(m, n) = \begin{cases} 1 - P(m, n) & P(m, n) > \rho \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{F}(m, n)$ 为当前像素点灰度值; \mathbf{g} 为当前像素点取补运算后的归一化矢量(如式(2)所示); \mathbf{b}_j 为第 j 个背景抗体的权值矢量; D_j 为 \mathbf{g} 与 \mathbf{b}_j 间的模糊亲和力, δ 为防止溢出现象发生的参数; $P(m, n)$ 为当前抗原 \mathbf{g} 的背景模糊隶属度; E 为杂波抑制后的背景抑制结果; ρ 为抗原-抗体匹配共振警戒值。这里,模糊交 \wedge 为

$$[p_1, p_2, \dots, p_j] \wedge [q_1, q_2, \dots, q_j] = [\min(p_1, q_1), \min(p_2, q_2), \dots, \min(p_j, q_j)], \text{范数}|\cdot| \text{为} |Q| = \sum_{i=1}^M q_i。$$

1.3 建立局部空间背景模型—模糊拓扑背景记忆抗体库

融入自组织特征映射思想,设计一系列抗体进化学习策略来建立自适应局部空间背景模型—模

糊拓扑背景记忆抗体库。

1) 定义抗原-抗体共振状态,设定抗原-抗体匹配共振警戒值 ρ ,即抗原-抗体亲和力超过警戒值 ρ 意味着该抗原-抗体处于共振状态。

2) 给每个抗体分配一个存活率属性 v ,表征其生命力与活跃度,存活率越大的抗体具有越高的竞争优先权,且能存活越久。其主要用于抗体竞争选择与记忆抗体库的抑制阶段。

3) 融入自组织特征映射思想,采用竞争选择方式来进行抗原-抗体的匹配,并引入侧激励反馈方式来强化邻域抗体的存活率。

策略1保证了免疫学习中的成熟抗体不至于受到新抗原的干扰而导致被随意篡改甚至死亡;策略2能缩短抗体竞争选择时间,简化抗体网络的抑制问题;策略3使得抗体网络具有自组织性与相似紧凑性。

模糊拓扑背景记忆抗体库的学习算法如下:

初始条件:将第1个背景抗原进行一次非变异克隆作为抗体,并赋予随机的存活率 v_0 ($0 < v_0 < 1$),组成初始记忆抗体库 M_u 。

1) 每一次迭代执行以下步骤:

(1) 针对每一个背景抗原 \mathbf{g}_i ,执行以下步骤:

① 采用模糊相似度量计算其与抗体网络细胞的亲和力 $d_{i,k}$

$$d_{i,k} = \frac{|\mathbf{g}_i \wedge \mathbf{b}_k|^2}{|\mathbf{g}_i| \times |\mathbf{b}_k| + \delta} \quad (5)$$

② 依据存活率属性对抗体进行降序排列,竞争选择第一个发生共振的抗体 \mathbf{b}_{res} 。

③ 若不存在 \mathbf{b}_{res} ,则对 \mathbf{g}_i 进行一次非变异克隆得到一个新抗体,并赋予随机的存活率(大于零),

建立临时记忆抗体库 M_1 , 转至步骤⑥; 若存在 b_{res} , 则对 b_{res} 进行 T 次变异性克隆繁殖 T 个后代 b_i^p (即预先设定繁殖邻域半径 R_1 , 在 b_{res} 的邻域范围

内随机生成后代抗体), 建立临时记忆抗体库 $M_2 \{b_i^p | t=1, \dots, T\}$, 如图 3 中实线圆区域内的空心圆所示。

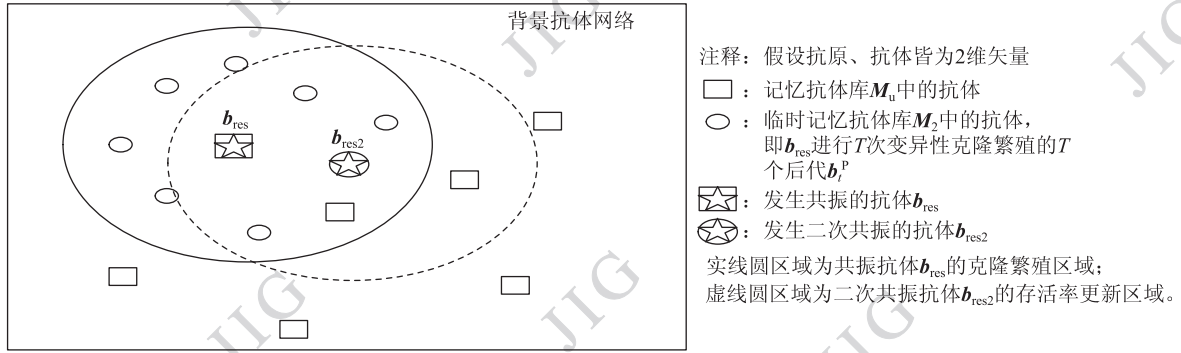


图 3 模糊拓扑背景记忆抗体网络模型

Fig. 3 The network model of fuzzy topological memory antibody bank

④不考虑存活率因素,重新计算 g_i 与 b_{res} 、 T 个 b_i^p 的模糊亲和力和。

⑤竞争选择最高亲和力的抗体 b_{res2} (二次共振), 并将其模糊亲和力和 v_{max} 视为存活率

$$v_{max} = \frac{|g_i \wedge b_{res2}|^2}{|g_i| \times |b_{res2}| + \delta} \quad (6)$$

对其邻域内的 b_i^p 、 b_k 进行存活率更新, 如图 3 中虚线圆区域所示; 其中采用侧激励的反馈方式来更新强化邻域抗体的存活率, 设定高斯型邻域存活率更新权值

$$w_z = \exp\left(-\frac{\|b_{res2}, b_z\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

式中, b_{res2} 的邻域抗体 b_z 的权值与其到 b_{res2} 的距离成反比; 依据邻域抗体 b_z 的归属来进行相应的存活率更新

$$v_z = \begin{cases} v_{max} w_z & b_z \in M_2 \\ \beta v_{max} w_z + (1 - \beta) v_z & b_z \in M_u \end{cases} \quad (8)$$

式中, δ 为防止溢出现象发生的参数; v_{max} 为二次共振的模糊亲和力和; b_z 为 b_{res2} 存活率更新邻域内的抗体; w_z 为 b_z 的存活率更新权值; $\|b_{res2}, b_z\|$ 为抗体 b_z 与抗体 b_{res2} 的欧氏距离; σ 为权值分布标准差, 一般设 $\sigma = 0.05$; v_z 为 b_z 的存活率; β 为记忆抗体的存活率学习率或更新率。

⑥联合更新记忆抗体库 M_u 与临时记忆抗体库 M_1 或 M_2 , 即 $M_u \cup \{M_1 \text{ or } M_2\} \rightarrow M_u$ 。

⑦抑制记忆抗体库, 即删除存活率为零的抗体。
(2) 抑制记忆抗体库, 即依据存活率属性对抗

体进行降序排列, 清除后面 $\mu\%$ 的抗体。

2) 测试终止准则, 采用人工免疫系统常用的预设迭代法: 即预先设置迭代次数 λ 来判断是否停止循环。

采用 aiNet 局部背景抑制算法能依据当前局部空间数据建立符合该局部空间特性的局部空间背景模型—模糊拓扑背景记忆抗体库, 并随局部区域的移动而生成相应的空间背景模型, 具有较强的空间自适应性, 能较好地抑制背景杂波。

2 基于行列 k-means 聚类的阈值分割

采用 aiNet 局部背景抑制算法能消除背景干扰突显目标, 接着只需设置一个门限阈值就可提取出弱小目标。由于红外探测系统特殊的成像机制 (行或列扫描), 图像像素间具有较强的相关性, 经过背景杂波抑制后的抑制图像同样具有较强的相关性, 相同类别的像素在行和列方向上各自呈现出较强的一致性。因此, 依据此特性, 采用 k-means 聚类算法^[10], 在行方向与列方向上分别进行自适应聚类, 获取各自类别, 接着依据目标类别应具有的特征特性与出现频率特性来检测真实目标, 并命名该方法为基于行列 k-means 聚类的自适应分割算法。具体步骤如下:

1) 逐个扫描抑制图像像素点, 对当前像素点 y 所在的行与列分别采用基于误差平方和准则的 k-means 聚类算法进行自适应聚类, 其中采用随机初始类别划分法, 并假设初始类别数为 3; 接着得到该

行的所有类别 $\{R_i | i = 1, 2, \dots, K_r\}$ 与该列的所有类别 $\{C_i | i = 1, 2, \dots, K_c\}$, 其中 K_r, K_c 分别表示行和列方向上的类别数; 并得到当前像素点所属的行类别 R_y 与列类别 C_y 。

2) 分别计算当前行的灰度均值 M_r , 当前列的灰度均值 M_c , 当前像素点所属的行类别 R_y 的灰度均值 \bar{R}_y^M 与列类别 C_y 的灰度均值 \bar{C}_y^M , 并计算类别 R_y 的像素个数 R_y^F , 类别 C_y 的像素个数 C_y^F 。

3) If $(\bar{R}_y^M > M_r) \&\& (\bar{C}_y^M > M_c) \&\& (\varepsilon R_4 < R_y^F < \nu R_4) \&\& (\varepsilon R_4 < C_y^F < \nu R_4)$ then

$Z(y) = 1$ // 真实目标

else

$Z(y) = 0$ // 背景

end

式中, R_4 表示待检测目标在行方向或列方向上的先验目标尺寸; ε, ν 为类别出现频率控制参数 ($0 < \varepsilon \leq 1, \nu \geq 1$), 若两个参数控制的频率区间越窄, 虚警率越低, 频率区间越宽, 检测率越高。一般设置为 $\varepsilon = 0.5, \nu = 2$ 。

输出目标检测结果图 Z 。

3 实验结果

为了验证本文算法的有效性, 采用 12 段远距离红外视频进行验证实验, 并与其他算法进行对比验证。这些红外视频拍摄于超远探测距离条件下不同天气、不同时刻的高空场景, 其图像特点为: 红外背景存在大量的云层杂波干扰, 且存在典型的探测器干扰: 垂直扫描线干扰与散粒黑点干扰; 目标信噪比极低且尺寸极小, 一些红外样本图如图 4 中的第 1 行所示; 其中 6 段视频中的弱小目标尺寸约为 3×3 , 另外 6 段视频中的弱小目标尺寸约为 5×5 ; 其目标信噪比 SNR 约为 $0.5 \sim 1$; 每段红外视频的长度约 300 帧, 帧速为 15 帧/s。采用主观评价与客观评价相结合的方式评价目标检测的效果。由于目标弱小, 使用矩形框将检测到的目标框起来以便观察目标。

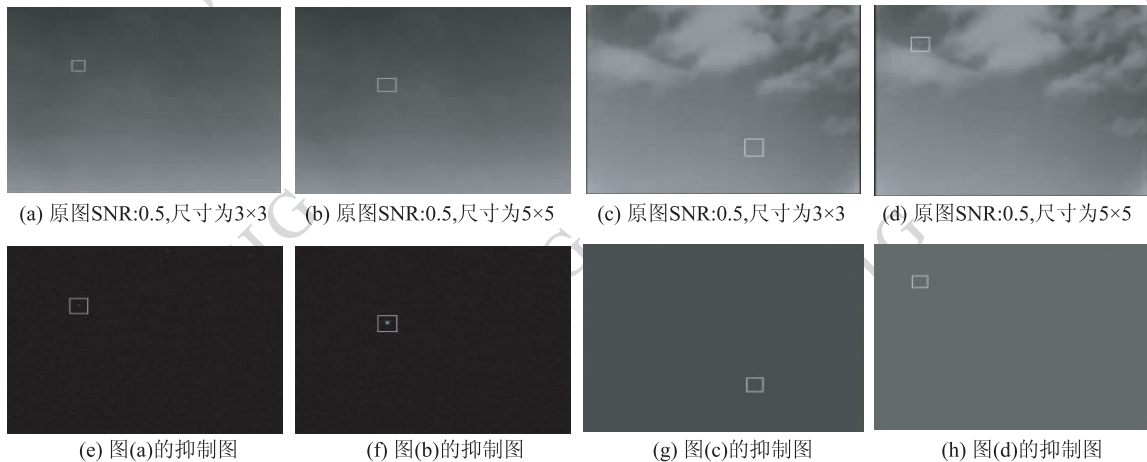


图 4 aiNet 背景抑制效果比较

Fig. 4 Background suppression results of aiNet

为了验证本文算法的鲁棒性和通用性, 采用单一的参数集设置来进行所有的验证实验。其中 aiNet 局部背景抑制算法部分: Robinson 警戒环的内围尺寸为 $R_2 = 5 \times 5$, 外围尺寸为 $R_3 = 7 \times 7$ (内围尺寸一般等于或略小于目标的尺寸); 溢出防止参数 $\delta = 0$ (防止浮点数溢出); 抗体繁殖邻域及存活率更新邻域的半径 $R_1 = 0.1$ (即抗体后代与父辈间的最大空间距离); 共振抗体克隆后代数目 $T = 10$ (即共振抗体繁殖的后代个数); 抗原-抗体匹配共振警戒

值 $\rho = 0.85$; 存活率更新权值分布标准差 $\sigma = 0.05$; 存活率学习率 $\beta = 0.6$; 记忆抗体库抑制参数 $\mu = 10$ (即在记忆抗体库抑制阶段, 清除后面 $\mu\%$ 的抗体); 迭代次数 $\lambda = 10$ 。基于行列 k-means 聚类的自适应分割算法中的类别出现频率控制参数设置为 $\varepsilon = 0.5, \nu = 2$, 先验目标尺寸 $R_4 = 5$ 。

首先就 aiNet 局部背景抑制部分进行验证实验, 分别对 12 段红外视频进行背景抑制, 其中一些样本图及其抑制结果如图 4 所示 (图中标注的信噪

比皆为原始图像目标信噪比),第 1 行为原始图片,图 4(a)和图 4(b)存在探测器垂直扫描线与散粒黑点干扰,而图 4(c)和图 4(d)则存在大量的云层杂波干扰,第 2 行为第 1 行相应的背景杂波抑制结果。从图 4 中可以看出:针对各种极低信噪比的红外图像,aiNet 局部背景抑制算法能有效地抑制云层背景杂波与探测器干扰,突显不同尺寸的弱小目标。

为了客观地评价提出的 aiNet 局部背景抑制算法的杂波抑制性能,采用其他 3 种算法进行对比实验,并采用 3 种通用的背景抑制评价指标进行客观评价。由于版面的限制,只给出 4 种算法的定量对比结果。对比的 3 种算法为:特征选择性滤波法(CSF)^[11]、最大最小值差分法(DMMF)^[12]和多尺度梯度法(MSG)^[13]。其参数设置为:特征选择性滤波法:模板尺寸 3×3,系数分布函数参数 $k=30$;最大最小值差分法:模板尺寸 7×7;多尺度梯度法:模板尺寸 5×5。

从客观角度出发,采用信噪比增益 $ISNR$ ^[14]、对比度增益 $ISCR$ ^[14]和背景抑制因子 BSF ^[4] 3 种背景下的抑制评价指标(如式(10)(12)(13)所示)来评价各种算法的背景抑制效果。 BSF 越大,则说明全

局背景平滑效果越好; $ISNR$ 和 $ISCR$ 越大,则说明算法抑制背景杂波和突显目标的能力越强。

$$SNR = |G_t - G_b| / \sigma_b \quad (9)$$

$$ISNR = SNR_{out} / SNR_{in} \quad (10)$$

$$SCR = |G_t - G_b| / |G_t + G_b| \quad (11)$$

$$ISCR = SCR_{out} / SCR_{in} \quad (12)$$

$$BSF = \sigma_{in} / \sigma_{out} \quad (13)$$

式中, G_t 、 G_b 分别为目标的平均灰度值和目标周围区域内的灰度值均值; σ_b 表示目标周围背景的标准差; SNR_{in} 、 SNR_{out} 分别表示输入图像和输出图像的信噪比; SCR_{in} 、 SCR_{out} 分别表示输入图像和输出图像的对比度; σ_{in} 和 σ_{out} 表示原始图像与输出图像的标准差。

4 种检测算法针对 12 段远距离红外视频的平均背景抑制评价指标结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出:特征选择性滤波法的 BSF 指标较高,其全局背景平滑性能较好,但其 $ISNR$ 及 $ISCR$ 指标较低,其局部杂波抑制效果欠佳;最大最小值差分法具有较高的 $ISCR$ 指标,但其 $ISNR$ 指标较低,其目标信噪比提升度不强;多尺度梯度法的 3 种指标均较低,其背景抑制性能一般;而本文提出的 aiNet 背景

表 1 4 种检测算法的平均背景抑制评价指标

Table 1 The average values of background suppression evaluation for four approaches

序列		CSF			DMMF			MSG			本文算法			
尺寸	SNR_{in}	SCR_{in}	$ISNR$	$ISCR$	BSF	$ISNR$	$ISCR$	BSF	$ISNR$	$ISCR$	BSF	$ISNR$	$ISCR$	BSF
3×3	0.49	0.01	9.54	13.75	45.67	4.22	103.31	3.79	0.71	1.32	8.28	35.12	130.76	14.54
3×3	0.80	0.01	5.64	7.91	45.78	2.54	62.49	3.81	0.88	1.64	8.35	21.28	79.29	14.54
3×3	0.99	0.01	4.46	6.15	45.72	2.04	50.02	3.82	0.94	1.77	8.39	17.08	63.56	14.54
3×3	0.50	0.01	9.16	6.64	3.03	4.05	105.73	0.61	1.26	0.61	1.85	22.50	135.86	3.94
3×3	0.80	0.01	5.35	3.90	3.06	2.50	64.85	0.61	1.35	0.66	1.87	14.15	83.96	3.94
3×3	1.00	0.02	4.18	3.06	3.07	2.00	52.36	0.61	1.41	0.70	1.88	11.57	68.09	3.94
5×5	0.50	0.01	6.39	8.91	23.02	6.83	99.99	3.25	0.61	0.73	6.60	55.80	113.50	9.47
5×5	0.80	0.01	3.89	5.34	23.10	4.21	61.66	3.27	0.80	0.96	6.65	34.61	70.04	9.58
5×5	1.00	0.02	3.08	4.20	23.11	3.36	49.36	3.29	0.90	1.10	6.69	27.60	55.96	9.55
5×5	0.50	0.01	6.41	3.01	2.41	6.68	92.53	0.61	1.46	0.45	1.63	27.04	96.44	2.88
5×5	0.80	0.02	3.89	1.81	2.41	4.15	57.65	0.61	1.52	0.47	1.64	16.46	59.72	2.88
5×5	1.00	0.02	3.07	1.42	2.41	3.34	46.34	0.61	1.59	0.51	1.65	13.07	47.85	2.88
平均			5.42	5.51	18.57	3.83	70.53	2.07	1.12	0.91	4.62	24.69	83.75	7.72

抑制算法具有较高的 *ISNR* 与 *ISCR* 值,其局部杂波抑制效果较好,能有效地抑制局部背景杂波突显目标,其 *BSF* 指标也较好,说明本文算法具有一定的全局背景平滑效果。

接着本文就所提出的整体检测算法与上述3种算法进行比较验证。图5为4种算法针对4个视频序列中的一些样本图片的检测结果,从图5可以看出,特征选择性滤波法能同时检测出两种

尺寸的目标,但其未能有效抑制云层杂波导致出现一些虚假目标;最大最小值差分法和多尺度梯度法都能检测出两种尺寸的弱小目标,但其虚警率较高,其中最大最小值差分法的检测结果存在明显的目标扩散现象;而本文算法能有效地检测出不同背景下两种尺寸的弱小目标,且能有效地抑制云层杂波及探测器干扰,检测结果无虚假目标存在,其检测性能较好。

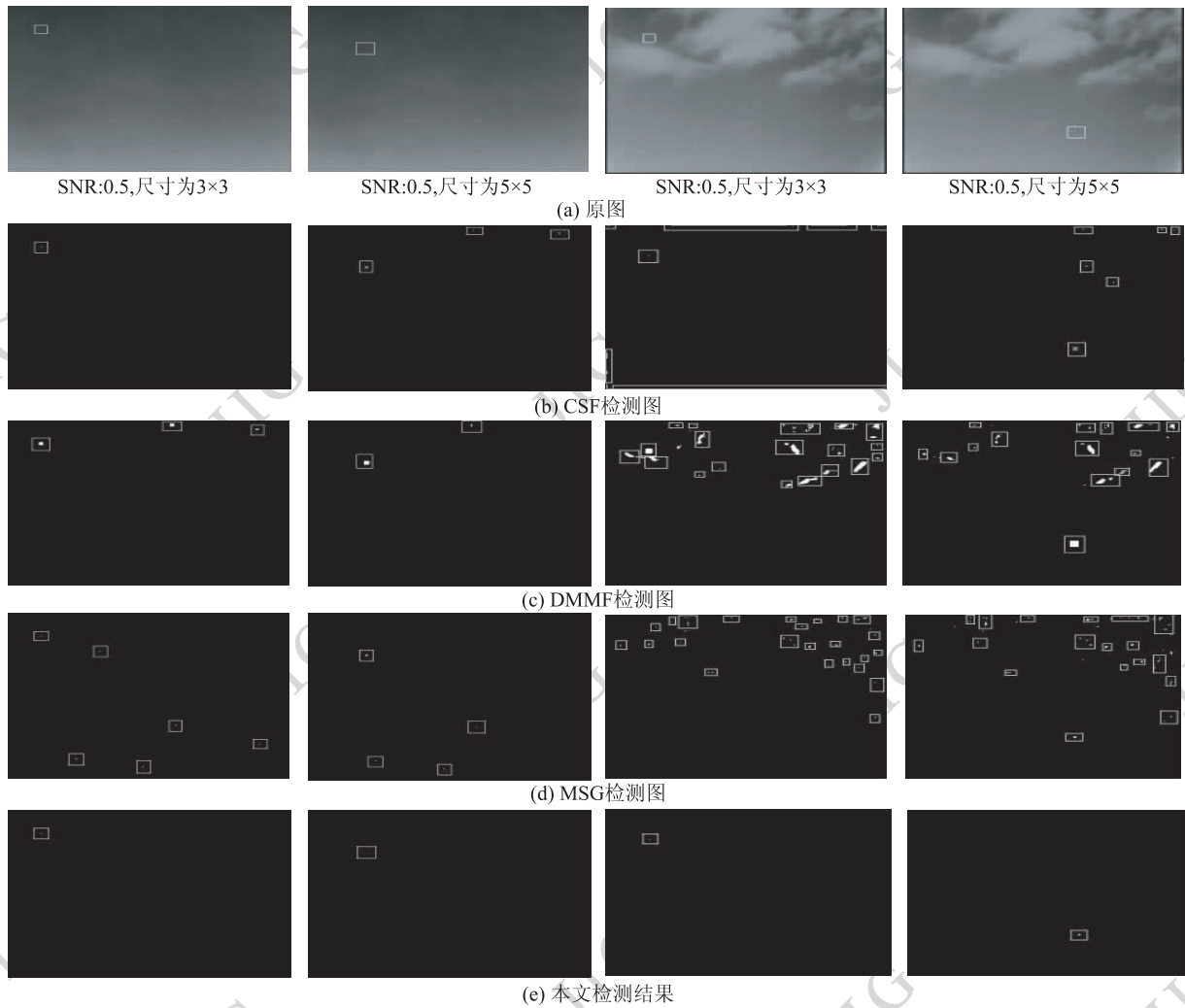


图5 4种检测算法间的检测效果比较

Fig. 5 Visual comparison of detection results of four approaches across different images

为了客观地评价本文算法的检测性能,采用目标检测领域标准通用的检测评价指标 r (检测率)、 p (准确率)和 $F1$ 指标^[15]来评价弱小目标的检测结果。

$$F1 = \frac{2 \times r \times p}{r + p} \quad (14)$$

式中, r 为检测到的正确目标数与真实目标总数之

比; p 为检测到的正确目标数与检测到的目标总数之比($1-p$ 即虚警率)。一个好的检测算法应具有较高的 r 值,同时保持较高的 p 值;较高的 $F1$ 值也意味着好的检测性能。

4种检测算法的3种目标检测指标评价结果如表2所示。从表2中可以看出各种检测算法的总体

检测性能:特征选择性滤波法具有较高的检测率,但其准确率一般,其总体检测性能较好;多尺度梯度法和最大最小值差分法具有较高的检测率,但其准确

率较低,其总体检测性能一般;而本文算法同时具有较高的检测率和准确率,且具有较好的检测稳定性,其 $F1$ 指标高达 99.8%。

表 2 4 种检测算法的平均目标检测评价指标

Table 2 The average values of target detection evaluation for four approaches

序号	CSF			DMMF			MSG			本文算法		
	r	p	$F1$	r	p	$F1$	r	p	$F1$	r	p	$F1$
1	1.000	1.000	1.000	1.000	0.650	0.788	1.000	0.520	0.684	1.000	1.000	1.000
2	1.000	1.000	1.000	1.000	0.677	0.807	1.000	0.567	0.724	1.000	1.000	1.000
3	1.000	1.000	1.000	1.000	0.682	0.811	1.000	0.589	0.741	1.000	1.000	1.000
4	1.000	0.364	0.534	1.000	0.336	0.503	1.000	0.251	0.401	1.000	1.000	1.000
5	1.000	0.359	0.529	1.000	0.369	0.540	1.000	0.260	0.413	1.000	1.000	1.000
6	1.000	0.355	0.524	1.000	0.378	0.549	1.000	0.270	0.425	1.000	1.000	1.000
7	1.000	0.390	0.561	1.000	0.580	0.734	1.000	0.359	0.528	0.997	0.962	0.979
8	1.000	0.497	0.664	1.000	0.587	0.740	1.000	0.414	0.586	1.000	1.000	1.000
9	1.000	0.546	0.706	1.000	0.592	0.744	1.000	0.453	0.624	1.000	1.000	1.000
10	0.782	0.363	0.496	1.000	0.173	0.295	0.875	0.226	0.359	1.000	1.000	1.000
11	0.798	0.397	0.530	1.000	0.188	0.317	0.891	0.228	0.363	1.000	1.000	1.000
12	0.827	0.411	0.549	1.000	0.195	0.327	0.895	0.224	0.359	1.000	1.000	1.000
平均	0.951	0.557	0.674	1.000	0.451	0.596	0.972	0.363	0.517	1.000	0.997	0.998

最后就算法的计算复杂性进行分析,并与上述 3 种算法进行比较验证。采用 C#4.0 编程实现各种算法。实验环境:PC 机,Intel i3 2.4 G 处理器,4 GB 内存。经实验测试可得 4 种算法的运行时间:CSF:0.31 s/帧;MSG:0.36 s/帧;DMMF:0.14 s/帧;本文算法:0.78 s/帧。显然,本文算法的耗时最长。由于本文算法针对图像每个位置的建模过程是相互独立的,故采用多线程并行处理机制重新测试实现本算法,其运行时间为 0.4 s/帧,基本满足实时性要求。

由上述对比实验可得,提出的 aiNet 局部背景抑制算法具有较高的 $ISNR$ 、 $ISCR$ 及 BSF 背景抑制指标,其具有较好的局部杂波抑制与目标增强性能及一定的全局背景平滑效果,能有效地抑制背景杂波,突显目标;整体检测算法具有较高的目标检测率和准确率,其检测稳定性较好,能有效地检测出极低信噪比下的红外弱小目标。

4 结 论

提出了一种基于人工免疫网络 aiNet 的单帧红

外弱小目标检测算法。该算法将弱小目标视为抗原,将背景视为抗体,融入自组织特征映射拓扑思想,设计一系列抗体进化策略,提出一种 aiNet 局部背景抑制算法来抑制背景杂波,能较好地抑制背景杂波;提出的基于行列 k -means 聚类的自适应分割算法能自适应地提取真实目标。该算法同时具有较高的背景抑制指标与目标检测指标,其检测稳定性较好,能有效抑制背景突显目标,检测出不同复杂背景下的红外弱小目标。

现阶段未考虑目标运动时的尺寸变化情况,下一阶段将整合距离信息等多观测量来检测多种距离下的红外弱小目标。

参考文献 (References)

- [1] Wu Y Q, Luo Z J, Wu W Y. A method of small target detection in infrared image based on non-subsampled contourlet transform [J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(3): 477-481.
[吴一全, 罗子娟, 吴文怡. 基于 NSCT 的红外图像小目标检测技术[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(3): 477-481.]
- [2] Luo Y G, Yang D G, Zhuang Z W. Application of temporal-spa-

- tial domain filter in infrared small and dim targets detection system[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2010,39(3):571-575. [罗有敢,杨德贵,庄钊文. 时空域滤波方法在红外弱小目标检测系统中的应用[J]. *红外与激光工程*,2010,39(3):571-575.]
- [3] Yuan H G,Sun W D. Weak and small target detection based on multi-threshold classification and backward verification for infrared image sequence[J]. *Journal of Image and Graphics*,2009,14(8):1583-1589. [袁红刚,孙卫东. 基于多阈值分类与逆向求证的红外序列图像弱小目标检测方法[J]. *中国图象图形学报*,2009,14(8):1583-1589.]
- [4] Wang D B,Liu S Q,Kou X M,et al. Infrared background clutter suppression algorithm of adaptive regularization based on MRF[J]. *J. Infrared Millim. Waves*,2009,28(6):440-444. [汪大宝,刘上乾,寇小明,等. 基于MRF的自适应正则化红外背景杂波抑制算法[J]. *红外与毫米波学报*,2009,28(6):440-444.]
- [5] Lan J H,Yang X. Infrared small target detection based on danger theory[C]// *Proceedings of International Conference on Optical Instruments and Technology*. Bellingham:Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers,2009:75131C-1-9.
- [6] Gao K L,Mei D. A small target detection algorithm based on immune computation and infrared background suppression [C]// *Proceedings of the 3th International Conference on Natural Computation*. Piscataway:Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society,2007:630-634.
- [7] Mo H W. *Artificial Immune System Theory and Application*[M]. Harbin:Harbin Institute of Technology Press,2003:75-80. [莫宏伟. *人工免疫系统原理与应用*[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业出版社,2003:75-80.]
- [8] Leandro N C,Fernando J Z. An evolutionary immune network for data clustering [C]//*The 6th Brazilian Symposium on Neural Networks*. Piscataway:Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society,2000:84-89.
- [9] Luo J H, Ji H B, Liu J. An algorithm based on spatial filter for infrared small target detection and its application to an all directionalIRST system[C]// *Proceedings of the 27th International Congress on High-Speed Photography and Photonics*. Bellingham:Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers,2007:62793E-1-6.
- [10] Bian Z Q,Zhang X G. *Pattern Recognition*[M]. 2nd ed. Beijing:Tsinghua University press,2005:235-237. [边肇祺,张学工. *模式识别*[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2005:235-237.]
- [11] Cao Q,Bi D Y. Characteristic-selecting filtering in infrared small target detection [J]. *ACTA OPTICA SINICA*,2009,29(9):2408-2412. [曹琦,毕笃彦. 红外弱小目标检测中的特征选择性滤波方法[J]. *光学学报*,2009,29(9):2408-2412.]
- [12] Li T,Zhang J,Zhang C F,et al. Study on the detection of infrared small dim targets based on DMMFs[C]// *Proceedings of International Conference on Space Information Technology*. Bellingham:Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers,2005:59853R-1-6.
- [13] Yang Y,Yang X F,Wang B X,et al. A robust approach for detecting infrared small dim targets[C]// *Proceeding of Electronic Imaging and Multimedia Technology*. Bellingham:Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers,2007:68332B-1-6.
- [14] Qin H L,Liu S Q,Zhou H X,et al. Background suppression for dim small target with gabor kernel non-local means[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2009,38(4):737-741. [秦翰林,刘上乾,周慧鑫,等. 采用Gabor核非局部均值的弱小目标背景抑制[J]. *红外与激光工程*,2009,38(4):737-741.]
- [15] Maddalena L,Petrosino A. A self-organizing approach to background subtraction for visual surveillance applications[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*,2008,17(7):1168-1177.