

·信号与信息处理·

基于时域运动特征分析点目标检测方法

依玉峰^{1,2}, 田宏¹

(1. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308; 2. 中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

摘要:针对传统点目标检测方法无法精确检测出复杂背景下点目标的问题,根据点目标的红外辐射特性和时域运动特性,提出一种新颖的复杂背景下点目标检测方法。通过分析点目标的红外辐射特性和在序列图像中的能量变化特性,找到目标点与干扰点之间的差异。通过搜索领域内极大值点、去除噪点、去除目标灰度幅值变化缓慢的点和不服从二维高斯分布的点,检测出候选目标点;根据目标位置信息构造时空管道,沿时空管道预测下一帧目标可能出现的位置,根据同一目标在序列图像中能量变化特性和面积变化特性进行目标真伪性判断。实验结果表明,与传统的点目标检测方法相比,文中方法在点目标的检测精度和检测效率方面都有很大提高。

关键词:点目标检测;红外辐射特性分析;时空管道;能量变化;面积变化

中图分类号:TN219

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2017)-02-0025-07

Small Dim Target Detection Based on Sequential Motion Characteristics Analysis for Infrared Image Sequence

YI Yu-feng^{1,2}, TIAN Hong¹

(1. Key Laboratory of Electro-optical Information Control and Security Technology, Tianjin 300308, China;

2. Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

Abstract: The traditional methods for the detection of the small dim targets could not detect the small dim targets accurately and efficiently in IR image sequence with complex background. A novel algorithm for detecting small dim target is proposed to solve the above problems. Through analyzing the infrared radiation characteristics and sequential motion characteristics of the small dim targets in IR image sequence, the difference between the small dim targets and interference points can be found. The candidate targets can be detected by searching maximum gray pixels, removing noise, removing the targets with slowly intensity change and removing the targets without having a 2D Gaussian distribution. The spatial-temporal pipeline is designed according to target position change. The position of the targets in the next frame could be predicted along the direction of the spatial-temporal pipeline. The real targets can be detected according to the energy change and area change of the targets in the IR image sequence. Experimental results show that the accuracy and efficiency of our proposed method is improved significantly comparing with the traditional small dim targets detection methods.

Key words: small dim target detection; infrared radiation characteristics analysis; spatial-temporal pipeline; energy growth; area growth

近年来,随着科学技术的迅速发展,红外探测技术受到人们越来越多的关注,并被广泛地应用到森林防火、卫星遥感、产品质量监测和红外预警等

众多领域中。其中,点目标检测作为红外探测系统中前端处理环节,是红外探测系统中的一个重要组成部分,也是红外探测技术中的一个关键技术和难

收稿日期:2017-04-05

作者简介:依玉峰(1980-),男,博士研究生,主要研究方向为图像处理。

点问题。当目标与红外探测系统距离较远时,图像中目标点成像为一个 3×3 或 5×5 大小的亮斑或亮点,目标没有明显的灰度、边缘、纹理和其他结构特征,尤其是当背景比较复杂时,目标所在区域信杂比较低,目标与背景之间的边界模糊,点目标很容易淹没到背景中而无法得到准确的检测。另外,序列图像运动目标检测中,每秒需要处理几十甚至上百帧的图像,如何满足实时性要求是一个有待解决的问题。迄今为止,尚无一种有效的方法能够解决此类问题。

现有的点目标检测方法主要分为两大类:先跟踪后检测(TBD)和先检测后跟踪(DBT)方法。TBD方法将连续多帧数据整合起来进行处理,通过判断目标可能出现的运动轨迹来确定真实目标,经典的TBD方法包括基于Hough变换的直线航迹积累法^[1-2]、基于粒子滤波的递归方法^[3-4]和动态规划算法^[5]等。DBT方法首先应用单帧检测方法检测出候选目标,再根据候选目标连续多帧的能量和位置变化信息来确定目标。DBT方法在检测精度和检测效率上都优于TBD方法,并被广泛地应用到实时点目标检测系统中。经典TBD方法包括Deshpande等人提出的最大中值滤波方法^[6],根据目标区域灰度分布特性,通过抑制背景来检测点目标,但该方法受参数影响比较大,并且背景抑制算法会使目标强度减弱,导致后续检测难度增大,影响检测准确性。Soni等人提出一种无参数滤波方法^[7],能够精确地对简单背景下点目标进行提取,但该方法容易受到复杂背景的干扰,无法检测出淹没在复杂背景下的点目标。文献[8]提出了一种多阈值分类与逆向求证的红外序列图像点目标检测方法,采用均值滤波来抑制背景并获得候选目标,再通过多阈值判断来确定候选目标隶属于真实目标的等级,构造时空管道,逆向寻找可能出现的各类候选目标,并通过判断管道内的能量加权是否大于给定阈值来确定真实目标。由于目标成像点强弱与目标与探测器距离有关,应用多阈值方法无法准确提取候选目标点,可能造成目标丢失现象;另外,在多帧相关性判断过程中,由于序列图像中目标强度变化剧烈,仅仅通过能量来确定目标容易产生漏检。Yao Zhao等人提出一种双向二维最小均方滤波^[9],该方法首先对图像进行高斯平滑处理,再采用双向最小均方滤波方法得到4幅预测图像,通过融合预

测图像并选取合适的阈值来定位目标,该方法能够精确定位空背景下小目标,但仍无法精确提取复杂背景下点目标,并且由于算法运算量较大,无法满足实时性要求。

针对传统点目标检测方法检测率和检测效率低的问题,提出了一种基于时域运动特征分析点目标检测方法。根据点目标的红外辐射特性及其在热像仪中成像特性,分析点目标在图像中具有灰度和结构特征,提取满足给定特征的目标点作为候选目标点;再根据点目标的运动特性,目标在相邻帧间运动最大距离构造时空管道,沿时空管道寻找同一候选目标,通过目标在序列图像中能量和面积变化进行目标真伪性判断。文中算法检测出的点目标符合红外点目标的成像特性和运动特性,与其他点目标检测方法相比,此算法在检测精度和检测效率方面都有很大提高。

1 基于时域运动特征分析点目标检测

根据红外传感器工作环境不同,成像背景中可能包括天空、海洋和地面景物,而点目标在图像中具有目标尺寸小、能量低和结构简单特征。传统点目标检测方法对具有简单背景图像的点目标检测相对简单,而对于具有复杂背景的图像,点目标很难被检测出来。一般情况下,图像由目标、背景和噪声三部分组成,其数学模型如下式所示

$$f(n) = f_T(n) + f_B(n) + f_N(n) \quad (1)$$

式中, $f_T(n)$ 、 $f_B(n)$ 和 $f_N(n)$ 分别为红外图像 $f(n)$ 的目标分量、背景分量和噪声分量。从式(1)中可以看到,如果可以准确的预测出背景分量,并能够去除图像中存在的噪声,就能够准确地检测出目标,而在实际情况下,很难估计出背景和噪声分量。传统点目标检测方法如均值滤波、最大均值滤波、基于形态学滤波和三维方向滤波等方法^[10-13]将滤波后的图像作为背景图像,通过将原始图像与背景图像做差来得到差值图像,在差值图像中选取合适的阈值来检测点目标。一般情况下,由于点目标强度比较暗,且目标所占面积较小,通过滤波方法很难准确识别出点目标。滤波方法破坏了目标的结构信息,信息量的减少不利于候选目标的判别。另外,候选目标的选取依赖于对差值图像阈值选取的准确性,复杂背景条件下很难选取合适的阈值的

来检测目标。

1.1 点目标红外辐射特征分析

对点目标进行检测首先要找到点目标与干扰点之间的区别,传统点目标检测方法没有分析点目标自身具有的红外辐射特性和在序列图像中的运动特性,使得点目标检测结果不理想。文中根据点目标的红外辐射特性,来识别图像中点目标。红外点目标具有以下特性:

(1)极大值特性:由于目标在推进过程中,目标所在区域环境温度高达2 500~3 500 ℃,而其外界环境温度一般为20~30 ℃,目标在探测系统中成像具有领域极大值特性。

(2)服从二维高斯分布特性:目标成像时,由于

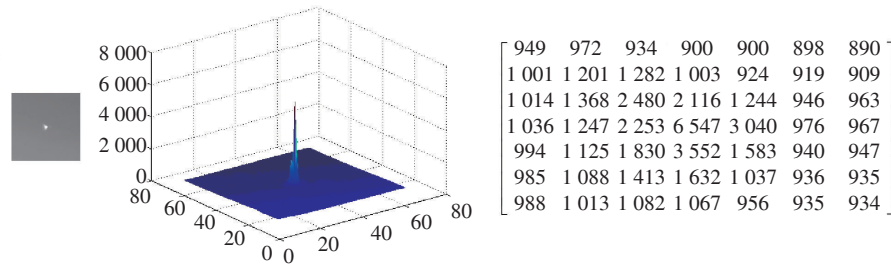


图1 点目标灰度分布示意图

(4)能量变化特性:点目标的能量变化与点目标的距离、运动方向和运动速度有关,而随着点目标运动,点目标在序列图像中的能量逐渐变化。点目标在序列图像中能量的强度由以下几方面决定:

- ①目标能量强度;
- ②目标与热像仪之间的距离;
- ③热像仪分辨率;
- ④热像仪视场大小。

目标成像亮度大小可以由下式计算得到

$$I = \frac{E}{R^2} = \frac{L \times S}{R^2} \quad (3)$$

式中, I 为目标成像后的灰度幅值; E 为目标能量大小; R 为目标与成像系统距离; L 为目标亮度; S 为目标面积。从式中可以知道,在目标能量不变的情况下,随着目标的接近,目标灰度幅值成几何变化。

(5)目标成像面积变化:目标成像面积由目标能量在空气中传播的辐射半径、目标与热像仪之间的距离和成像系统设计、热像仪分辨率、热像仪视场大小有关,随着目标运动,目标成像在图像中所占面积逐渐变化。目标成像原理图如图2所示。

镜头不能完美地汇聚所有光线,目标成像也非一个孤立亮点,而是形成一个服从二维高斯分布的弥散圆,其数学模型如下式所示

$$f_o(n) = \lambda \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2} \right] \right\} \quad (2)$$

式中, (x,y) 为目标所在点的空间坐标; (x_0,y_0) 为目标灰度最大值点所在中心坐标; λ 为目标灰度最大值; σ_x 和 σ_y 分别为水平和垂直尺度参数。

(3)目标灰度幅值变化剧烈特性:由于远距离目标在图像中成像一般为一个点目标,随着目标距离的接近,目标在图像中所占面积逐渐增大(一般为3×3或5×5),且目标所在区域灰度幅值变化比较剧烈(点目标灰度分布信息如图1所示)。

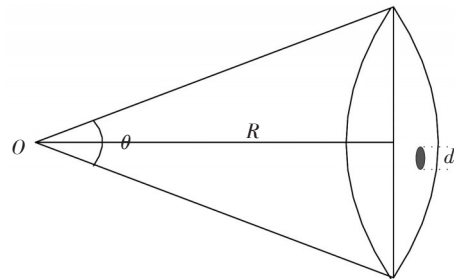


图2 目标成像原理图

根据目标成像原理图,可以得到目标成像大小计算公式如下式所示

$$n_s = \frac{d \times w}{2 \times R \times \tan(\frac{\theta}{2})} \quad (4)$$

式中, θ 为成像系统视场角大小; R 为目标与成像系统距离; d 为目标辐射直径大小; w 为每行图像所占像素数; n_s 为目标在成像系统中成像所占像素数。

根据以上特性分析可以知道,前3个特性是目标自身具有的红外辐射特性,可以用来进行单帧目标检测;后2个特性是目标在运动过程中具有的时域运动特性,可以用来对目标进行多帧关联分析,

进行疑是目标真伪性判断。

1.2 单帧目标提取

通过以上点目标红外辐射特性分析可以知道,点目标在图像中具有灰度极大值特性、服从二维高斯分布特性和幅值变化剧烈特性,根据点目标的具有的红外辐射特性,采用以下方法来检测图像中存在的点目标,并将其作为多帧检测的候选目标。

(1)遍历整幅图像,搜索领域极大值点,其公式如下式所示

$$S(i,j) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(x,y) - f(x+i,y+j) > 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

$$R_M = \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{i=-1,j=-1}^{i=1,j=1} S(i,j) = 8 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

式中, $f(x,y)$ 为图像中 (x,y) 点灰度值; $f(x+i,y+j)$ 为以 (x,y) 点为中心8邻域点灰度值; i,j 取值范围为 $\{-1,0,1\}$ 且 i,j 不同时为0。当 R_M 为1时,当前点为邻域极大值点。

(2)去除图像中噪点:从步骤(1)的检测结果中找到以当前点为中心,其 3×3 邻域外围8个点的最大值和 5×5 领域外围16个点的最大值,并分别记为 $\max 8$ 和 $\max 16$,有下式

$$R = \frac{f(x,y) - \max 8}{f(x,y) - \max 16} \quad (6)$$

$$S = \begin{cases} 0 & \text{如果 } T_l < R < T_h \\ 1 & \text{否则} \end{cases}$$

式中, T_l 和 T_h 分别为0.95和1.05;当 $S=0$ 时,当前点为噪点予以去除。

(3)从步骤(2)的检测结果中找出服从二维高斯分布的点,由于远距离探测目标成像为一个点目标,为了提高程序运行效率,简化高斯模型计算公式如下式所示

$$C(i,j) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(x+i,y+j) - f(x+2 \times i,y+2 \times j) > 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

$$R_g = \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{i=-1,j=-1}^{i=1,j=1} C(i,j) = 8 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

式中, $f(x+i,y+j)$ 为以 (x,y) 点为中心8邻域点灰度值; $f(x+2 \times i,y+2 \times j)$ 为与 $(x+i,y+j)$ 相邻点灰度值。当 R_g 为1时,当前点服从二维高斯分布。

(4)从步骤(3)的检测结果中找出幅值变化剧

烈的点:首先计算 3×3 领域外围8个点的均值、 5×5 领域外围16个点的均值和 17×17 领域外围64个点的均值,并将它们分别记为 $\text{mean}8$ 、 $\text{mean}16$ 和 $\text{mean}64$,以 $\text{mean}64$ 为背景值,计算当前最大值点与 $\text{mean}8$ 和 $\text{mean}64$ 差值的比值, $\text{mean}16$ 和 $\text{mean}64$ 差值的比值,并分别将其记为 R_1 和 R_2 ,有下式

$$R_1 = \frac{f(x,y) - \text{mean}8}{f(x,y) - \text{mean}64}, R_2 = \frac{f(x,y) - \text{mean}16}{f(x,y) - \text{mean}64}$$

$$S' = \begin{cases} 1 & \text{如果 } R_1 > T_2 \text{ 或 } \\ & T_1 < R_1 < T_2 \text{ 且 } R_2 > T_3 \text{ 或 } \\ & T_1 < R_1 < T_2, R_2 < T_3 \text{ 且 } f(x,y) > 1.5 \times \text{mean}64 \\ 0 & \text{否则 } R_1 < T_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $T_1=0.2, T_2=0.7, T_3=0.95$ 为经验值,如果 $R_1 > T_2$,则认为目标灰度变化剧烈,该点所在目标为一个大小为 3×3 的服从二维高斯分布的目标点;如果 $T_1 < R_1 < T_2$ 时,并且 $R_2 > T_3$ 时,该点所在目标为一个大小为 5×5 服从二维高斯分布的目标点;否则,如果同时满足 $T_1 < R_1 < T_2$ 和 $R_2 < T_3$ 时,并且当前灰度最大值点灰度大于1.5倍的 $\text{mean}64$ 时,则认为当前点所在目标为一个大于 5×5 的目标点,目标中心区域饱和;否则,背景值计算有误,该疑是目标点可能位于一个面积较大的干扰物上。当 $S'=0$ 时,当前点为干扰点予以去除,否则该点为候选目标点并予以保留。

1.3 时空管道法

根据点目标的红外辐射特性分析,点目标在序列图像中具有能量变化和面积变化等时域运动特性,为了确定单帧检测得到的候选目标点是否为真实目标点,利用点目标在序列图像中的时域运动特性来确定真实目标。首先建立目标特征库,确定当前帧图像中每个候选目标点的归属和是否为新出现的目标,根据同一候选目标在相邻帧的空间位置变化构造适当的时空管道,沿时空管道方向将同一候选目标的能量和面积变化作为目标的判定依据,时空管道示意图如图3所示。

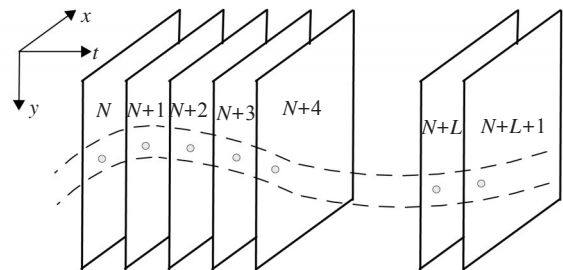


图3 时空管道示意图

判定过程由以下几个步骤组成。

(1) 相邻帧间最大位移估算

根据目标属性、运动速度、热像仪帧频,估算目标在相邻帧中的最大可能位移量 D_{\max} 。

(2) 构造时空管道

在时间轴上从候选目标出现的时刻起在 L 帧内,构造一个以候选目标中心、 D_{\max} 为半径的时空管道,通过目标运动轨迹预测目标在下一帧中出现的位置;根据当前帧时空管道中出现的候选目标的特征,判断该目标是新出现的候选目标或者与前一帧管道中目标为同一目标。若当前帧中未出现候选目标,则将时空管道延伸至下一帧,等待候选目标的出现。

(3) 门限判断

如果 L 帧内同一目标出现次数小于 $N(N < L)$, 则该目标点为非真实目标点;否则,对时空管道内出现的同一个目标,根据目标能量变化特性和面积变化特性进行目标真伪性判断。

根据目标能量变化特性可知,随着目标的接近,目标在红外探测设备中的成像灰度幅值逐渐增强,其判定公式如下所示

$$N_i = \sum_{m=k}^{k+L-1} A_i^m \quad i \in [1, n] \quad (9)$$

$$A_i^m = \begin{cases} 1 & \text{if } E_i^m(x, y) - E_i^{m-1}(x, y) \geq 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

式中, i 表示图像中出现的第 i 个目标点; k 为第 i 个目标点出现帧; $E_i^m(x, y)$ 为第 i 个目标点在第 m 帧中的能量幅值。

根据目标面积变化特性可知,随着目标的接近,目标在红外探测设备中的成像面积逐渐增加,其判定公式如下所示

$$N'_i = \sum_{m=k}^{k+L-1} B_i^m \quad (i \in [1, n]) \quad (10)$$

$$B_i^m = \begin{cases} 1 & \text{if } S_i^m(x, y) - S_i^{m-1}(x, y) \geq 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

式中, $S_i^m(x, y)$ 为第 i 个目标点在第 m 帧中所占面积。

当目标出现在不同距离时,目标与背景能量差值不同,为了提高目标检测率,采用多阈值目标能量累积公式来实现快速精确地目标检测。第 i 个目标能量累积公式如下式所示

$$C_i = \sum_{m=k}^{k+L-1} E_i^m(x, y) \quad (11)$$

根据目标强度不同,将目标分为三个等级:强目标、中等强度目标和弱目标,考虑到不同能量强

度目标累积能量的差异和对目标检测反应时间的要求(阈值选取根据强目标反应时间短,弱目标反应时间长原则选取能量累积阈值),采用不同阈值对各级强度目标进行真伪性判断,其判断公式如下式所示

$$D_i = \begin{cases} 1 & \text{if } C_i > T_c \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (12)$$

$$T_c = \begin{cases} 4000 & 60 < C_i/L < 150 \\ 5000 & 150 \leq C_i/L < 1000 \\ 12000 & C_i/L \geq 1000 \end{cases}$$

当 D_i 、 N_i 和 N'_i 同时满足下式所示条件时,当前候选目标为真实目标点,否则为干扰点。

$$D_i = 1, N_i \geq \frac{2}{3}L, N'_i \geq \frac{1}{2}L \quad (13)$$

式中, $i \in [1, n]$ 表示检测到的第 i 个目标。

(4) 遍历所有候选目标点

在目标库中遍历所有候选目标点,重复上述步骤(1)~步骤(3),对所有候选目标点的真伪进行判定,确定为真实目标后对目标进行跟踪。

2 结果与分析

为了验证文中算法的可行性,选用四组红外序列图像进行仿真实验:第一组为天空背景图像,目标上升阶段受大气影响严重,目标所在区域信噪比低;第二组为天空背景图像,图像中杂波和噪声点干扰较多,目标上升阶段被云层遮挡,目标所在区域信噪比低;第三组为天地背景图像,目标发射阶段受地面复杂背景影响严重,目标与地背景灰度差异较小,目标上升阶段,天空背景干净,无干扰点干扰;第四组为天地背景图像,目标发射阶段受地面复杂背景影响严重,目标背景对比度低,目标上升阶段,天空背景干净,目标运动轨迹上存在假目标干扰。分别采用基于形态学滤波点目标检测方法、基于中值滤波点目标检测方法和文中所提基于红外辐射特性的点目标检测方法对四组图像进行仿真实验,采用检测率、多帧检测率、虚警率和多帧虚警率四种性能指标来客观评价算法性能。实验环境在主频 3.29 GHz、内存 1.9 GB 的 pc 机,采用 VC++ 6.0 编程实现。

2.1 时空管道法

对多帧图像序列进行检测(设图像序列中目标

出现的次数为 m_1), 检测到目标的次数为 n_1 , 则目标检测率为检测到目标的次数与目标实际数目的比值, 其公式如下式所示

$$P_1 = \frac{n_1}{m_1} \quad (14)$$

为了分析算法在整个检测过程中的检测性能, 定义多帧检测率概念, 即序列图像中, 每帧图像中

检测到目标(真实目标)次数之和与目标在每帧图像中出现次数之和的比值, 其公式如下式所示

$$P_1' = \frac{n_1'}{m_1'} \quad (15)$$

分别应用三种算法对四组序列图像进行仿真实验, 统计各组图像目标检测率和多帧检测率, 实验结果如表1所示。

表1 图像序列点目标检测率测试结果

算法	图像	目标实际数	检测到目标数	检测率/%	目标在每帧中出现次数之和	每帧中检测到目标次数之和	多帧检测率/%
形态学滤波点目标检测算法	第一组	1	1	100	316	99	31.3
	第二组	1	0	0	90	0	0
	第三组	1	1	100	220	165	74.1
	第四组	1	1	100	296	48	16.2
中值滤波点目标检测算法	第一组	1	1	100	316	273	86.4
	第二组	1	1	100	90	56	62.2
	第三组	1	1	100	220	165	75.0
	第四组	1	1	100	296	162	54.7
文中算法	第一组	1	1	100	316	262	82.9
	第二组	1	1	100	90	56	62.2
	第三组	1	1	100	220	156	70.9
	第四组	1	1	100	296	180	60.8

2.2 红外图像序列虚警概率测试

对多帧图像序列进行检测(设图像序列中目标出现的次数为 m_2), 检测到候选目标而目标实际不存在的次数为 n_2 , 虚警率为检测到候选目标而目标实际不存在的次数与检测次数的比值, 其公式如下式所示

$$P_2 = \frac{n_2}{m_2} \quad (16)$$

为了分析算法在整个检测过程中的检测性能, 定义多帧虚警率概念, 即序列图像中, 每帧图像中检测到目标而目标不存在次数之和与目标在每帧图像中出现次数之和的比值, 其公式如下式所示

$$P_2' = \frac{n_2'}{m_2'} \quad (17)$$

分别应用三种算法对四组序列图像进行仿真实验, 统计各组图像目标的虚警率和多帧虚警率, 实验结果如表2所示。

表2 图像序列点目标虚警率测试结果

算法	图像	目标实际数	检测到目标目标不存在次数	虚警率/%	目标在每帧中出现次数之和	每帧中检测到目标目标不存在次数之和	多帧虚警率/%
形态学滤波点目标检测算法	第一组	1	0	0	316	0	0
	第二组	1	0	0	90	0	0
	第三组	1	0	0	220	0	0
	第四组	1	1	100	296	260	87.9
中值滤波点目标检测算法	第一组	1	8	800	316	1 151	364.2
	第二组	1	9	900	90	292	324.4
	第三组	1	1	100	220	115	52.3
	第四组	1	7	700	296	1 171	395.6
文中算法	第一组	1	0	0	316	0	0
	第二组	1	0	0	90	0	0
	第三组	1	0	0	220	0	0
	第四组	1	0	0	296	0	0

分别对不同类型的红外序列图像进行仿真实验,实验结果如表1和表2所示,从图像和实验结果中可以看到,目标能量弱、面积小、杂波多,这些都干扰了点目标的检测精度。由于基于形态学滤波点目标检测方法通过对图像进行开运算来获取背景图像,当目标面积较小且能量较弱时,会造成残差图像中目标部分残差较小或无残差,出现目标丢失现象,导致目标检测率低(如表1所示);基于中值滤波点目标检测方法易受杂波和复杂背景干扰,单帧检测得到过多疑是目标点,增加了虚警出现概率(如表2所示),并且,处理疑是目标点数目的增加也导致算法运行效率的降低。

文中根据目标自身具有的红外辐射特性对目标进行检测,检测得到的疑是目标点较少且检测率高、虚警率低(如表1、表2所示)。然而,由于采用时空管道法对序列图像运动特征进行判断,目标的确定需要进行多帧能量累积判断,因此,多帧检测率偏低。从图像和检测结果中可以知道,由于第一组图像中目标所在背景比较干净,且目标能量较强,目标能量累积所需帧数较少,多帧检测率较高;第二组图像中背景杂波较多,并且,目标运动过程中被云层遮挡,目标距离较远导致目标成像能量较弱,目标能量累积需要帧数较多,这些都增加了目标检测难度,检测结果中其目标检测率较低;第三组图像中,目标发射阶段,天地交界处受地气影响,导致目标在该区域信噪比低,增加了检测的难度,目标升空阶段,目标所在天空背景降低了目标检测难度;第四组图像中,目标受干扰源影响,导致目标多帧检测率较低。采用三种方法对四组图像进行目标检测,平均每帧检测时间如表3所示。文中算法运行效率远高于其他两种方法。

表3 图像序列弱小目标检测时间

图像/运行 时间	形态学滤波 算法/ms	中值滤波 算法/ms	文中算法 /ms
第一组	60.5	51.24	25.29
第二组	58.67	56.93	24.47
第三组	43.74	39.13	19.1
第四组	44.14	39.4	19.27

3 结 论

红外点目标检测技术作为红外探测技术的一

个研究热点,有着重要的现实研究价值。文中在分析大量点目标成像特性的基础上,提出一种基于时域运动特征分析点目标检测方法,根据目标与干扰点的区别,在单帧检测过程搜索图像中的领域极大值点、保留服从二维高斯分布的点、保留幅值变化剧烈的点并去除其中的噪点。对单帧检测过程中得到的疑是目标点,采用时空管道法来跟踪目标,并通过能量累积、能量变化和面积变化特性判断疑是目标是否为真实目标。对具有不同背景的红外序列图像进行仿真实验,实验结果表明,该算法能够有效地抑制杂波和噪点的干扰,环境适应性好,能够在各种不同复杂背景条件下准确地检测出点目标。与传统点目标检测算法相比,此算法具有高检测率、低虚警率、高执行效率的特性。

参考文献

- [1] Rutten M G, Gordon N J, Maskell S. Recursive track-before detect with target amplitude fluctuations[J]. IEE Proc. Radar Sonar Navigation, 2005, 152(5): 345-352.
- [2] LI Zheng-zhou, LI Jia-ning, GE Feng-zeng, et al. Dim moving target tracking algorithm based on particle discriminative sparse representation[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 75:100-106.
- [3] Johnston L A, Krishnamurthy V. Performance analysis of a dynamic programming track before detect algorithm [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(1): 228-242.
- [4] 荆丹,王俊.基于粒子滤波理论的雷达多目标TBD检测[J].雷达科学与技术,2008,6(1):48-51.
- [5] Barniv Y. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1985, 21(1):144-156.
- [6] Deshpande, S D, Er, et al. Max-Mean and Max-Median filters for detection of small-targets[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3809:74-83.
- [7] Soni, T, Zeidler, et al. Performance evaluation of 2-D adaptive prediction filters for detection of small objects in image data[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1993, 2(3):327-340.
- [8] 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点目标检测方法[J].中国图像图形学报,2009,14(8):1583-1589.
- [9] ZHAO Yao, PAN Hai-bin, DU Chang-ping. Bilateral two-di-

(下转第61页)

电过程的超级电容器电压波形如图10。

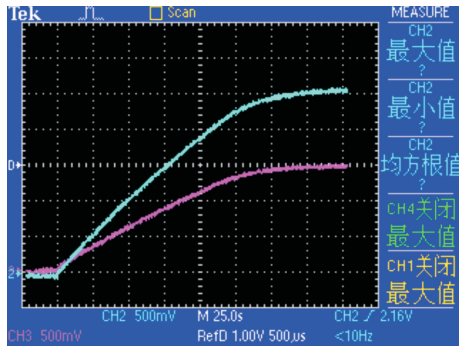


图9 无均衡电路的超级电容器电压波形

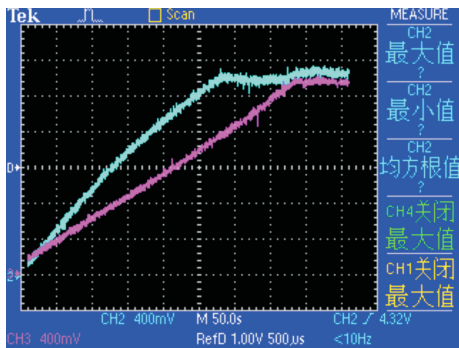


图10 采用文中均衡电路的超级电容器电压波形

测试结果表明,在电容量差异巨大状态下,文中的均衡电路可以很好地将高电压超级电容器多余电荷有效地均衡到端电压低的超级电容器中,实现电压均衡。

5 结论

与采用消耗电能为代价的均压电路相比,采用

DC/DC 变换器作为均压电路,可以有效的降低均压电路的损耗,降低了电路的温升,提高了电路的可靠性。

采用动态电压均衡可以在超级电容器充电过程很宽的范围工作,相对限压型电压均衡方式,具有更好的电压均衡效果^[3]。

采用 DC/DC 变换器可以将电压高的超级电容器多余电荷转移到电压低的超级电容器,令均衡电路具有更高的均衡性能。

参考文献

- [1] 胡国文,李超,林萍. 超级电容器电压均衡技术研究综述[J]. 电测与仪表, 2014, 51(22): 22-31.
- [2] 李洪珠,王俏,张垒,等. 半桥变换器与多变压器次级串联的超级电容均压[J]. 电源学报, 2017, 15(1): 75-80.
- [3] 许爱国,谢少军,刘小宝. 串联电容器动态电压均衡技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(12): 111-116.
- [4] 蒋玮,胡仁杰,张金龙. 一种新型回馈式串联超级电容器组均压策略[J]. 电力电子技术, 2011, 45(9): 21-23.
- [5] 陈哲群,徐刚,余得贵. 锂离子电池均衡电路设计与策略验证[J]. 电池, 2016, 43(6): 140-143.
- [6] 陈之勃,陈永真. 超级电容器的动态电压均衡方法的研究[J]. 辽宁工业大学学报, 2013(5) 298-300.
- [7] 陈亮,王秋瑶. 双通道旋转变压器解码系统设计[J]. 光电技术应用, 2016, 31(3): 50-53.
- [8] 王储. 一种反射单元不对称规则采样法步进电机控制技术[J]. 光电技术应用, 2016, 31(3): 54-56.
- [9] 杨乾,蔡敬海. 供电兼容性试验要求的机载设备电源适配性设计方法[J]. 光电技术应用, 2016, 31(6): 53-58.
- [10] 王志鹏,韦莉,顾帅,等. 超级电容器均衡方案设计综述[J]. 电器与能效管理技术, 2015(18): 55-60.

(上接第31页)

mensional least mean square filter for infrared small target detection[J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 65: 17-23.

[10] 朱风云,秦世引. 海天混杂闪烁背景下运动点目标检测新方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(12): 1384-1387.

[11] Bai X, Zhou F. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection[J]. Pattern Recognition, 2010, 43 (6): 2145-2156.

[12] BAI Xiang-zhi, ZHANG Shan, DU Bin-bin, et al. Survey on dim small target detection in clutter background: wavelet, inter-frame and filter based algorithms[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 479-483.

[13] HU Jing, YU Yi, LIU Fan. Small and dim target detection by background estimation[J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 73: 141-148.