

文章编号 1004-924X(2019)04-0945-08

基于高信背比的视频低速暗弱目标增强

张 刘¹, 张皓晨¹, 刘付成², 满益云³, 孙 俊², 张冠宇^{1*}

(1. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130061;

2. 上海航天控制技术研究所, 上海 200030;

3. 钱学森空间技术实验室, 北京 100094)

摘要:为了解决图像处理领域缺少一个描述目标信号显著程度的物理量的问题, 引用了光谱学中信背比的概念, 类比于信噪比的计算方法, 求出目标信号平均灰度值与背景平均灰度值之比, 直观地表示出目标信号与背景的对比值。同时, 为了解决视频中低速暗弱目标难以分辨与检测的问题, 提出了一种视频低速暗弱目标增强方法, 首先对视频首尾的连续多帧图像进行叠加差分运算, 得到平滑的差分图像, 然后进行灰度变换迭代, 获得高信背比的图像。实验结果表明, 信背比可以有效地描述了目标信号的显著程度, 采用提出的视频低速暗弱目标增强方法后, 目标信号的信噪比由 1.84 增加至 9.18, 信背比由 0.33 增加至 19.44, 提高了接近 60 倍, 暗弱目标的显著程度大幅度提高, 达到了视频低速暗弱目标增强的要求。

关键词:图像处理; 信背比; 目标增强; 低速暗弱目标

中图分类号: TN911.73; TP751.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192704.0945

Video enhancement method for low-speed dim targets based on high signal-to-background ratio

ZHANG Liu¹, ZHANG Hao-chen¹, LIU Fu-cheng²,
MAN Yi-yun³, SUN Jun², ZHANG Guan-yu^{1*}

(1. College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China;

2. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 200030, China;

3. Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangguanyu@jlu.edu.cn

Abstract: Previous studies have used signal-to-background ratio in spectroscopy to address the lack of physical quantities that describe target signal saliency in image processing. Similar to the signal-to-noise ratio calculation method, the ratio of the average gray value of the target signal to the average gray value of the background was obtained, therefore, the contrast between the target signal and the background was visually demonstrated. However, a video enhancement method was proposed for low-speed dim targets to distinguish and detect low-speed dim targets in videos. First, a smooth

收稿日期: 2018-10-12; **修订日期:** 2018-11-14.

基金项目: 科技部重点研发计划资助项目 (No. 2016YFB0501003); 上海科学技术委员会重点项目资助 (No. 16DZ1120400); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51705187); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 2017M621202); 上海航天科技创新基金资助项目 (No. SAST2018-046).

differential image was obtained by overlying the image sequences at the beginning and end of the video to distinguish between them. Then, an image with a high signal-to-background ratio was obtained by gray transformation iteration. Experimental results have shown that, the target signal saliency was effectively described by the signal-to-background ratio. Using the video enhancement method for low-speed dim targets, the signal-to-noise ratio of the target signal increased from 1.84 to 9.18, and the signal-to-background ratio increased from 0.33 to 19.44, which is approximately 60 times higher. The saliency of the low-speed dim target signal in the video has significantly improved, thus fulfilling the requirements for low-speed dim targets.

Key words: image processing; signal-to-background ratio; target enhancement; low-speed dim targets

1 引言

视频运动目标检测技术是一门多学科综合的应用技术^[1-2],旨在采用非接触的方式探测目标,运用识别算法,可以实现对目标的类型判别和控制等任务。传统的视频运动目标检测方法主要有帧差法^[3]、背景差分法^[4]和光流法^[5]。此外,众多学者提出了大量改进的视频运动目标检测方法:陆牧等^[6]提出了一种基于元胞自动机的动态背景运动目标检测算法;周同雪等提出一种利用边缘信息的三帧差分法与基于混合高斯模型的背景减法相结合的运动目标检测算法^[7];崔杰等^[8]提出一种基于帧差法的多波束前视声呐运动目标检测算法等。然而上述的运动目标检测方法,所针对的目标大多为运动速度快、与背景对比度高的较大目标,当面对像元个数少、运动速度缓慢、与背景对比度低的暗弱目标时,检测效果往往较差,因此有必要进行目标增强处理。

常用的增强方法有:直方图均衡化^[9-11]、Retinex 算法^[12-13]和同态滤波算法^[14],然而,直方图均衡化是对整幅图像的像素点进行处理,增强了目标的同时,也增强了背景和噪声;Retinex 算法的计算量较大,容易出现光晕化现象,且噪声也会被放大;同态滤波算法的计算量极大,且要针对不同场景设置不同的滤波器。此外,众多学者针对特定目标提出了目标增强算法,例如,杨力铭等^[15]提出了基于非偏振光照明的水下偏振成像目标增强技术;张焱等^[16]提出了基于红外虚拟偏振的目标增强方法等,然而这些算法不具备通用性,只能应用在特定领域。因此,研究一种具有通用性、实时性的暗弱目标增强算法具有十分重要的意义。

在图像处理领域中,并没有一个直观的物理量可以表现目标的显著程度,往往是通过肉眼来判断。本文针对这一问题,首先引用了光谱学中信背比的概念,对目标信号的显著程度进行量化,直观地表示出目标信号与背景的平均灰度值之比。然后提出了一种基于高信背比的暗弱目标增强方法,通过连续多帧图像叠加差分运算和灰度变换迭代,达到增强低速暗弱目标的要求。最后通过实验验证了此方法具有较强的增强效果,不仅获得了高信背比图像,还提高了图像的信噪比,对于解决视频低速暗弱目标检测存在困难的问题具有很好的应用价值。

2 信背比的概念及计算方法

视频图像信号可以描述为:

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

其中:常数 k 表示视频的第 k 帧图像,对应为不同的时刻, $f(x, y, k)$ 表示第 k 帧图像中像素点 (x, y) 的灰度值, $f_t(x, y, k)$, $f_b(x, y, k)$ 和 $n(x, y, k)$ 分别表示该像素点的信号灰度值、背景灰度值和噪声灰度值。

在图像处理领域中,并没有一个直观地物理量来表现目标的显著程度,往往是通过肉眼判断的。部分学者采用信噪比来衡量图像质量的好坏^[17],其计算方法为:

$$\text{SNR} = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{\sigma} = 10 \lg \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{\sigma}, \quad (2)$$

其中: μ_1 为信号灰度平均值, μ_2 为背景灰度平均值, σ 为信号周围的噪声,一般采用灰度的标准差代替,单位为 dB。

然而,信噪比虽然能在一定程度上表现图像

的噪声状况,但在针对暗弱目标时,并不能起到评估其显著程度的作用。为了解决这一问题,本文引用了光谱学中信背比这一概念,规定信背比SBR为信号区域像素点的平均灰度值比上背景区域像素点的平均灰度值,且信号区域像素点不含有背景灰度值,背景区域像素点也不含有目标信号灰度值。因此,当像素点 (x, y) 属于信号区域时:

$$f_S(x, y, k) = f_i(x, y, k) + n(x, y, k). \quad (3)$$

当像素点 (x, y) 属于背景区域时:

$$f_B(x, y, k) = f_b(x, y, k) + n(x, y, k). \quad (4)$$

根据信背比的概念,并类比于信噪比的计算方法,给出信背比的计算方法为:

$$SBR = 10 \left| \lg \frac{f_S(x, y, k)}{f_B(x, y, k)} \right| = 10 \left| \lg \frac{f_i(x, y, k) + n(x, y, k)}{f_b(x, y, k) + n(x, y, k)} \right|. \quad (5)$$

与信噪比不同的是,由于灰度值的数值不代表绝对的大小,仅代表白色与黑色之间的灰度等级,因此信背比不存在正负之分,故在进行计算时取其绝对值。由式(5)可知,当信背比 $SBR=0$ 时, $f_S(x, y, k) = f_B(x, y, k)$, $f_i(x, y, k) = f_b(x, y, k)$,信号灰度值与背景灰度值相等,信号与背景完全无法分辨。

在选定目标区域时,采用人工选取的方法,原因如下:一是在未经处理的视频样本图像中,目标与背景灰度值相近,且存在颤振与光线变化等因素的干扰,因此无法选择准确的阈值进行分割;二是在处理后的图像中,存在干扰区域,采用门限分割方法可能导致信背比的计算出现错误。

3 低速暗弱目标增强方法

本文仅考虑视频中低速移动的暗弱目标,如图1所示,方框内为暗弱目标,图1(a)为视频初始时刻图像,图1(b)为视频结束时刻图像。

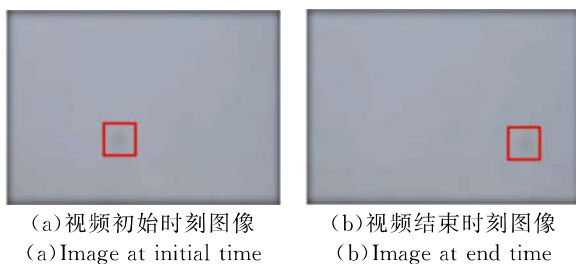


图1 简单背景下的低速暗弱目标

Fig. 1 Low-speed dim target in a simple background

当对图1中的暗弱目标进行检测时,使用传统的检测方法以及改进的检测方法,往往都无法检测到目标,或者检测到大量虚假目标,都没有达到很好的效果。因此本文提出一种通过连续多帧图像的叠加、差分及灰度变换迭代等手段,提高图像信背比,增加目标信号显著程度,便于提取与识别的暗弱目标增强算法。主要由以下两个关键步骤完成:

步骤一:叠加差分运算

在视频首尾分别获取连续的 m 帧图像,并将所有图像进行预处理。然后将前 n 帧图像与后 n 帧图像进行叠加平均,获得两幅新图像,具体操作方法为,将 n 帧图像中对应像素点的灰度值进行累加,然后除以 n ,即:

$$\begin{cases} f_{n1}^*(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n f(x, y, i)}{n} \\ f_{n2}^*(x, y) = \frac{\sum_{i=m-n+1}^m f(x, y, i)}{n} \end{cases}. \quad (6)$$

由于背景不变,且目标运动速度很慢,所以在几十帧内可近似认为目标静止,仅存在颤振与光线变化。而灰度值只取整数,因此式(6)可以使图像更加平滑,减小拍摄颤振与光线变化造成的影响。将两幅新图像进行差分运算,对应像素点灰度值相减并取绝对值,得:

$$f_n^*(x, y) = |f_{n1}^*(x, y) - f_{n2}^*(x, y)|. \quad (7)$$

此时,两幅图像共有的背景区域几乎被完全削减,差分图像理论上仅存在目标在起始时刻和终止时刻的影像。但是由于拍摄颤振与光线变化造成的影响只能被减弱而不能被完全消除,因此差分图像依旧可能存在大量的干扰像素点。由于差分效果的好坏与叠加参数 n 有关,因此取 n 的初始值为1,并进行步长为1的循环,直至 $n=m$,此时获得 m 幅差分图像,选择其中信背比最高的差分图像进行下一步操作。

步骤二:灰度变换迭代

计算差分图像的最大灰度值 Max ,将整幅差分图像进行灰度拉伸,即:

$$f_n(x, y) = f_n^*(x, y) \times \frac{255}{Max}. \quad (8)$$

由于背景区域被削减,其像素灰度值必小于目标区域像素灰度值,因此计算拉伸图像的平均

灰度值 Avg , 并令所有像素点的灰度值减去 Avg , 得到新的差分图像, 即:

$$f(x, y) = f_n(x, y) - Avg. \quad (9)$$

此时, 背景被进一步削减, 信背比提高。将式(8)与式(9)进行迭代, 直至信背比达到合格指标。图 2 为暗弱目标增强算法流程图。

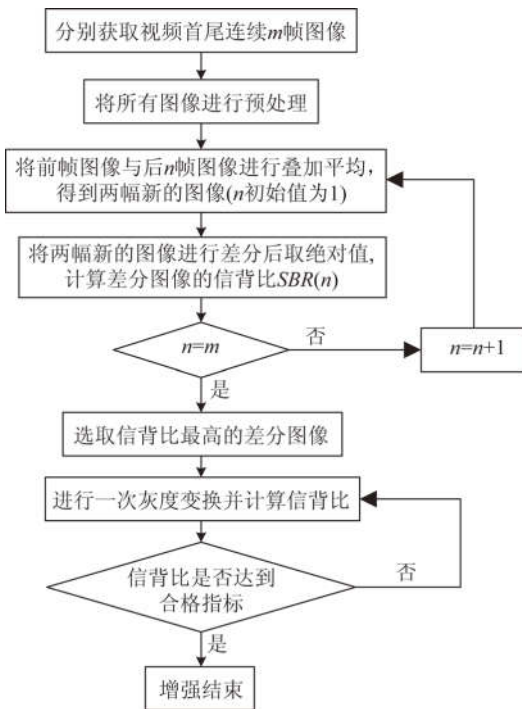


图 2 视频低速暗弱目标增强算法流程图

Fig. 2 Flow chart of video enhancement method for low-speed dim targets

4 仿真与结果分析

以墙体为背景, 控制一个与墙体颜色基本相同的小球在空中进行低速移动, 录制一段视频。受到拍摄颤振及光线变化的影响, 视频背景存在肉眼不可见的微弱变化。在视频开头和结尾处分别获取了连续 50 帧图片(共 100 帧), 如图 1 所示, 为视频第一帧与最后一帧图像, 经过计算, 其信噪比 $SNR \approx 1.74$, 信背比 $SBR \approx 0.33$ 。

首先采用传统的视频运动目标检测算法, 即帧差法^[3]、背景差分法^[4]和光流法^[5]分别进行目标检测, 其中, 帧差法与背景差分法的样本图像均来源于获取的 100 帧图像, 光流法的样本图像为整段视频的图像, 检测结果如图 3 所示。

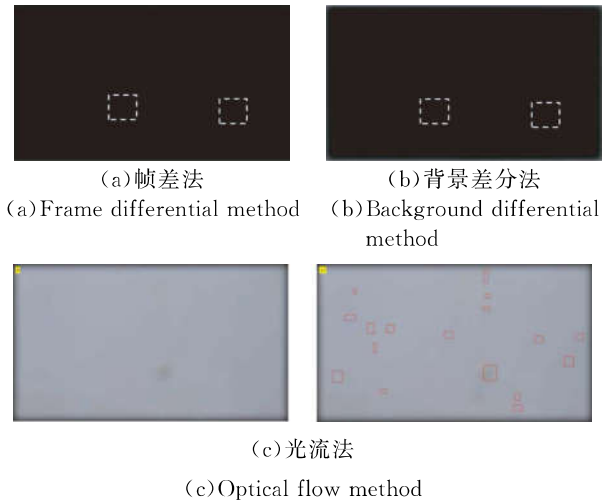


图 3 传统视频运动目标检测方法结果

Fig. 3 Results of traditional video moving object detection method

表 1 传统视频运动目标检测方法结果的信噪比与信背比
Tab. 1 SNR and SBR of results of traditional video moving object detection method

| | 帧差法 | 背景差分法 | 光流法 |
|-----|-------|-------|------|
| SNR | 16.59 | 10.35 | 1.84 |
| SBR | 1.12 | 3.73 | 0.38 |

图 3(a)为帧差法的结果图像, 白色虚线框是人为添加的, 其内部为目标所在区域, 实验样本为第一帧图像与第二帧图像, 采用其他实验样本所得实验结果与之相似。其信噪比 $SNR \approx 16.59$, 信背比 $SBR \approx 1.12$ 。由于小球运动速度缓慢, 相邻两帧甚至几十帧的图像都基本相同, 各像素点的灰度值也基本相同, 因此两帧图像作差后, 所得图像为较为平滑的黑色图像, 信噪比较高, 然而由于目标信号也同样被消除, 因此信背比极低, 无法有效检测出目标信号;

图 3(b)为背景差分法的结果图像, 白色虚线框是人为添加的, 其内部为目标所在区域, 实验样本为第一帧图像与背景图像, 采用其他实验样本所得实验结果与之相似。其信噪比 $SNR \approx 10.35$, 信背比 $SBR \approx 3.73$ 。由于拍摄时收到颤振与光线变化的干扰, 背景存在肉眼不可见的微弱变化, 因此经计算得到的背景与图像中的背景存在一定差异, 差分后所得图像背景与图 3(a)相比不够平滑, 信噪比稍低, 而由于背景与目标信号

灰度值差别极小,因此信背比极低,无法有效检测出目标信号。

图3(c)为光流法的结果图像,在整个检测过程中,大多数时刻都如第1幅图像所示,无法检测到目标信号;个别时刻如第2幅图像所示,检测到大量虚假信号。其信噪比 $SNR \approx 1.84$,信背比 $SBR \approx 0.38$ 。在检测过程中,由于小球运动速度极慢,相邻帧图像难以检测到目标的光流变化,而背景像素点在某些时刻会发生微弱的灰度值变化,引起相邻帧图像的光流变化,导致某些时时刻出现大量虚假目标,因此无法有效检测出目标信号。

由此可见,传统的视频运动目标检测方法在面对低速暗弱目标时,效果较差,往往无法检测到目标,或者检测到大量虚假目标。

采用本文提出的低速暗弱目标提取算法进行目标增强,首先进行步骤一,即叠加差分运算,按照流程图中的循环进行,共进行了50次叠加差分,最后取其中较有代表性的4次,即1,10,35,40幅图像的实验数据作为对比,如图4所示(白色虚线框内为目标所在区域)。

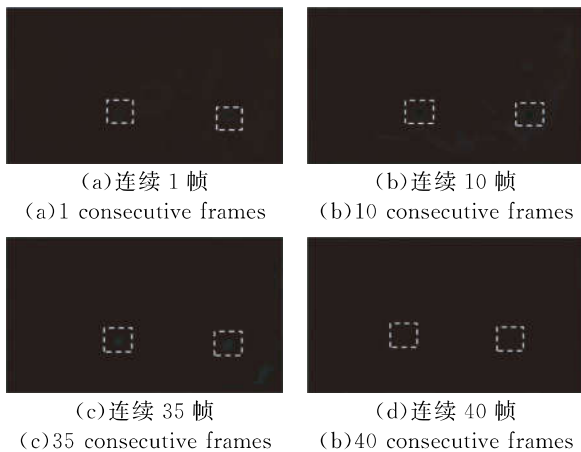


图4 连续 n 帧叠加差分运算结果

Fig. 4 Results of overlaying n consecutive frames

表2 连续 n 帧叠加差分结果信噪比与信背比

Tab. 2 SNR and SBR of results of overlaying n consecutive frames

| | 连续1帧 | 连续10帧 | 连续35帧 | 连续40帧 |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| SNR | 9.82 | 7.79 | 8.97 | 12.96 |
| SBR | 10.33 | 12.25 | 17.59 | 1.87 |

经计算,图4(a)的信噪比 $SNR \approx 9.82$,信背比 $SBR \approx 10.33$,目标信号不明显,几乎难以分辨,但目标细节最为完整且背景削减效果较好;图4(b)的信噪比 $SNR \approx 7.79$,信背比 $SBR \approx 12.25$,目标信号略为明显,但目标信号周围与其他背景区域均出现了大量干扰像素点;图4(c)的信噪比 $SNR \approx 8.97$,信背比 $SBR \approx 17.59$,目标信号最为明显,图像较为平滑,但细节不够完整且图像背景区域存在少量干扰像素点;图4(d)的信噪比 $SNR \approx 12.96$,信背比 $SBR \approx 1.87$,目标信号与背景区域完全难以分辨。

由此可知,对连续不同帧数图像进行叠加差分运算,其结果的信噪比相差不大且都能够令人满意,图像越平滑,信噪比越高。然而信噪比高的图像并不一定目标信号最为显著,例如图4(d)的信噪比最高,图像最为平滑,但是目标信号几乎全部消失。而图4(c)的信背比最高,且目标信号最明显,证明了信背比是可以用来衡量目标显著程度的。

此外,并不是选取的帧数越多,处理效果越好,而是存在一个最优解,使结果的信背比最高。可以看出,本例中35帧即为最优解,超过35帧后信背比反而会迅速减小,因此选取图4(c)进行步骤二。同时选取细节最为完整且背景削减效果最好但信背比较低的图4(a)进行步骤二作为对比,两幅图像分别进行了50次迭代,最后分别选取两幅图像迭代20次和50次的结果图像作比较,如图5所示。

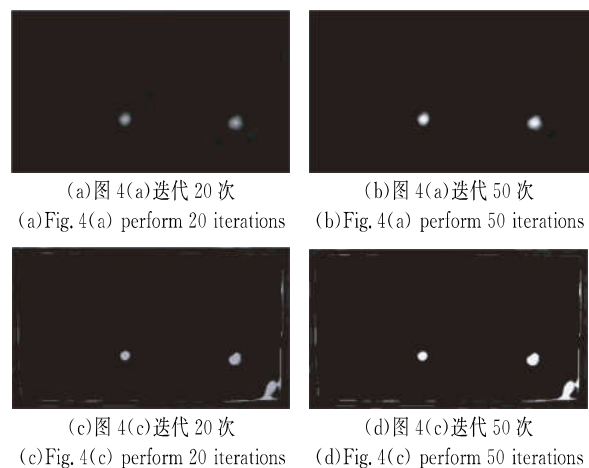


图5 灰度变换迭代结果

Fig. 5 Results of gray transformation iteration

表 3 灰度变换迭代结果的信噪比与信背比

Tab. 3 SNR and SBR of results of gray transformation iteration

| | 图 4(a) | 图 4(a) | 图 4(c) | 图 4(c) |
|-----|---------|---------|---------|---------|
| | 迭代 20 次 | 迭代 50 次 | 迭代 20 次 | 迭代 50 次 |
| SNR | 13.05 | 12.46 | 9.18 | 8.98 |
| SBR | 23.01 | 24.17 | 19.44 | 19.08 |

经计算,图 5(a)的信噪比 $SNR \approx 13.05$,信背比 $SBR \approx 23.01$,目标信号显著,但是背景存在部分干扰像素点;图 5(b)的信噪比 $SNR \approx 12.46$,信背比 $SBR \approx 24.17$,目标信号非常显著,背景几乎无干扰像素点;图 5(c)的信噪比 $SNR \approx 9.18$,信背比 $SBR \approx 19.44$,目标信号显著程度与(b)相仿,但背景同样存在少量干扰像素点,干扰程度大于图 5(a)与图 5(b);图 5(d)的信噪比 $SNR \approx 8.98$,信背比 $SBR \approx 19.08$,目标信号最为显著,然而背景存在干扰像素点,干扰程度大于图 5(c);虽然图 5(a)与图 5(b)的信噪比与信背比都略高于图 5(c)与图 5(d),但是图 5(a)与图 5(b)是在步骤一的结果中通过肉眼观察后根据经验选取出来的,实际操作中不可能每次都由人来进行此项工作。而图 5(c)与图 5(d)是根据最高信背比选取出来的,其信噪比与信背比虽然略小于图 5(a)与图 5(b),但是仍然令人满意,可以达到检测要求,更便于算法进行自主运算。

由于图 5(c)与图 5(d)存在较为明显的背景干扰像素点,可以看出,若不考虑背景干扰像素点的影响,图 5(b)与图 5(c)的局部信背比较为接近,图 5(d)的局部信背比最高。因此可以得出结论,差分图像的信背比越高、迭代次数越多,处理结果的局部信背比就越高,目标显著程度也越高,但消耗的时间会随迭代次数的增加而增加,因此在信背比达到指标的前提下,应该尽量减少迭代次数以减少算法运行时间,提高算法的效率。

为了证明步骤一的必要性,对视频第一帧图像直接进行步骤二操作,进行灰度变换迭代 50 次,所得结果如图 6 所示。

图 6 的信噪比 $SNR \approx 3.80$,信背比 $SBR \approx 15.05$,虽然信背比较高,但信噪比很低,且处理结果极差,完全丢失目标信号且出现一个虚假目标与大量干扰像素点。因此说明,步骤一有效地对视频图像的背景进行了平滑,避免处理结果出现

大量干扰像素点或虚假目标,是十分必要的。

本文提出的视频暗弱目标增强算法,具有十分明显的增强效果,信噪比由 1.84 增加至 9.18,信背比由 0.33 增加至 19.44,提高了接近 60 倍,所得结果的目标信号及其显著;步骤一中,并非叠加帧数越多信背比越高,而是存在一个最佳叠加帧数,其差分图像的信背比最高,当超过这一帧数后,差分图像的信背比会迅速下降;步骤一完成后,存在信背比略低的差分图像,在进行步骤二后也可以得到高信背比图像,然而往往需要人员通过经验判断,无法在实际应用中实现操作;步骤一有效地对视频图像的背景进行了平滑,避免处理结果出现大量干扰像素点或虚假目标,是十分必要的。步骤二中,迭代次数越多,局部信背比越高,目标信号越显著,但运算时间会随着迭代次数的增加而增加。



图 6 视频第一帧图像灰度变换迭代 50 次结果

Fig. 6 Result of the first frame image performing 50 gray transformation iterations

5 结 论

本文引用信背比这一概念,来对目标信号显著程度进行量化,在信噪比相近的条件下,信背比越高,目标信号越显著。此外,提出一种低速暗弱目标增强算法,通过两个关键步骤:叠加差分运算与灰度变换迭代,获得高信背比的图像,使目标信号更明显,便于提取与识别。通过仿真结果对比分析,证明了本文提出的基于高信背比的视频低速暗弱目标增强算法,有效克服了无法直观表示目标信号显著程度的问题,并具有十分明显的增强效果,大大提高了目标信号的显著程度,对于解决视频低速暗弱目标检测存在困难的问题具有很好的应用价值。

参考文献:

- [1] 李静宇,刘艳滢,田睿,等. 视频监控系统中的概率模型单目标跟踪框架 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 2093-2099.
LI J Y, LIU Y Y, TIAN R, *et al.*. Probabilistic model single target tracking framework for video surveillance system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 2093-2099. (in Chinese)
- [2] ANNA B, ANDREW Z, XAVIER M. Scene classification using a hybrid generative/discriminative approach [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 30(4): 712-727.
- [3] LIPTON A J, FUJIYOSHI H, RATIL R S. Moving target classification and tracking from real-time video [C]. *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision. Princeton*, 1998: 8-14.
- [4] CHEN B S, LEI Y Q, LI W W. A novel background model for real-time vehicle detection [J]. *Signal Processing*, 2004, 2(7): 1276-1279.
- [5] 刘洪彬,常发亮. 权重系数自适应光流法运动目标检测 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 460-468.
LIU H B, CHANG F L. Moving object detection by optical flow method based on adaptive weight coefficient [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2): 460-468. (in Chinese)
- [6] 陆牧,朱明,高扬,等. 基于元胞自动机的动态背景运动目标检测 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1934-1940.
LU M, ZHU M, GAO Y, *et al.*. Moving target detection based on dynamic background of cellular automaton [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(7): 1934-1940. (in Chinese)
- [7] 周同雪,朱明. 视频图像中的运动目标检测 [J]. 液晶与显示, 2017, 32(1): 40-47.
ZHOU T X, ZHU M. Moving target detection of the video images [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays.*, 2017, 32(1): 40-47. (in Chinese)
- [8] 崔杰,胡长青,徐海东. 基于帧差法的多波束前视声呐运动目标检测 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 169-176.
CUI J, HU CH Q, XU H D. Moving target detection for multi-beam forward-looking sonar based on frame-difference method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(2): 169-176. (in Chinese)
- [9] 姚若河,黄继武,吴湘洪. 改进的直方图均衡化图像增强算法 [J]. 铁道学报, 1997(6): 79-82.
YAO R H, HUANG J W, WU X Q. An improved image enhancement algorithm of histogram equalization [J]. *Journal of the China Railway Society*, 1997(6): 79-82. (in Chinese)
- [10] 刘松涛,王维,殷福亮. 基于动态广义直方图均衡的红外图像增强方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(7): 1411-1414+ 1451.
LIU S T, WANG W, YIN F L. Infrared image enhancement method based on dynamic and generalized histogram equalization [J]. *Systems Engineering and Electronics*. 2010, 32(7): 1411-1414+ 1451. (in Chinese)
- [11] 刘锦辉. 图像增强方法的研究以及应用 [D]. 长沙: 湖南师范大学, 2009.
LIU J H. *Research and Application on Image Enhancement Methods* [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2009. (in Chinese)
- [12] LAND E H. Recent advances in Retinex theory and some implications for cortical computations: color vision and the natural images [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1983, 80(16): 5163-5169.
- [13] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODSELL G A. Properties and performance of a center/surround Retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(3): 451-462.
- [14] 焦竹青,徐保国. 基于同态滤波的彩色图像光照补偿方法 [J]. 光电子激光, 2010, 21(4): 602-605.
JIAO ZH Q, XU B G. Color image illumination compensation based on homomorphic filtering [J]. *Journal of Optoelectronic. Laser*. 2010, 21(4): 602-605. (in Chinese)
- [15] 杨力铭,梁健,张文飞,等. 基于非偏振光照明的水下偏振成像目标增强技术 [J]. 光学学报, 2018, 38(6): 162-167.
YANG L M, LIANG J, ZHANG W F, *et al.*. Underwater polarimetric imaging target enhancement technology based on unpolarized illumination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 162-167. (in Chinese)
- [16] 张焱,邱跳文,李吉成,等. 基于红外虚拟偏振的目标增强方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(5): 992-997.
ZHANG Y, QIU T W, LI J CH, *et al.*. Infrared surface target enhancement based on virtual variational polarization [J]. *Systems Engineering and*

Electronics, 2015, 37(5): 992-997. (in Chinese)

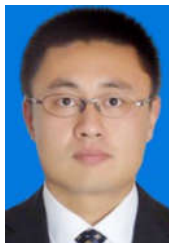
- [17] 曹雷. 低对比度目标探测跟踪技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.

CAO L. *Research on Low-contrast Target Detection and Tracking* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, , 2015. (in Chinese)

作者简介:



张 刘(1978—),男,安徽蚌埠人,教授,2007年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事航天光学遥感系统设计、仿真及应用技术,星敏器技术等研究。E-mail:zhangliu@jlu.edu.cn



张冠宇(1986—),男,吉林长春人,副教授,2015年于吉林大学获得博士学位,主要从事卫星姿轨一体化控制、空间对地图像信息处理技术的研究。E-mail:zhangguanyu@jlu.edu.cn