

文章编号:1001-9014(2006)05-0364-04

基于三阶累积量的红外弱小运动目标检测新方法

武斌, 姬红兵, 李鹏

(西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要:为检测强杂波背景中的红外弱小运动目标,提出了一种基于三阶累积量的检测新方法.该方法利用图像中目标经过时像素点灰度值有起伏变化这一特点,将其看作是一种非高斯弱瞬态信号,通过构造三阶累积量对其进行检测.此三阶累积量估计中的去均值处理同时实现了背景杂波的抑制,较好地改善了信杂比(SCR),提高了单帧检测性能.实验表明,该方法能够有效地抑制强杂波背景,在SCR>1时,能可靠检测目标.

关键词:弱小目标检测;瞬态信号检测;三阶累积量;红外图像序列

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

NEW METHOD FOR MOVING DIM TARGET DETECTION BASED ON THIRD-ORDER CUMULANT IN INFRARED IMAGE

WU Bin, JI Hong-Bing, LI Peng

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A new algorithm based on third-order cumulant was proposed to detect a moving dim infrared target under heavy background. Because the grey-scale value of a pixel in an image has fluctuation when a target passes by, this fluctuation can be viewed as a non-Gaussian weak transient signal, and its third-order cumulant can be calculated to detect this signal. The process of average-value-subtraction in the estimation of the third-order cumulant also suppresses the background clutter, and leads to a great improvement of the signal to clutter ratio (SCR) and the probability of the detection in single frame. The experimental results show that the algorithm can effectively suppress heavy clutter background and reliably detect dim infrared targets when SCR is larger than 1.

Key words: dim target detection; transient signal detection; third-order cumulant; IR image sequence

引言

目前,强杂波环境中对红外弱小运动目标的检测是红外搜索与跟踪系统、红外预警系统的一项核心技术,一直是该领域的研究热点和难点.传统的单帧检测,算法对强杂波和弱目标情况,检测性能很难满足要求.近来大多数算法则综合利用空间和时间信息,采用对红外序列图像的检测方法,典型的有管道滤波法^[1],但是在复杂背景低信噪比情况下,往往会出现多帧检测不到目标,特别是在有云层遮挡的情况下,管道法捕捉不到目标,导致检测失败.目前提出的一些新算法如基于小波^[2]、形态学^[3]等,都因计算复杂而不能满足实时处理的要求.

高阶统计量由于其对高斯噪声良好的抑制能力以及保留信号相位信息的特性,广泛地应用于信号

检测、参数估计等领域,取得了良好的效果,但是针对红外弱小目标检测方面的应用报道少见.本文利用图像中像素点在有目标经过时灰度值有微小起伏变化这一特点,将点目标检测转化为高斯噪声中瞬态信号的检测,通过构造各像素灰度值随时间变化信号的三阶累积量作为检测统计量,实现了弱小目标的检测.与目前大多数检测算法在空域抑制背景杂波不同,本文方法在三阶累积量估计中的去均值处理实际上起到了有效抑制强杂波平稳分量的效果,并且采用逐帧更新,提高了算法的实时性.

1 红外目标及背景特性分析

包含有弱小目标的红外场景图像序列描述为:

$$F(x, y, k) = F_T(x, y, k) + F_C(x, y, k) + N(x, y, k), \quad (1)$$

收稿日期:2005-11-02, 修回日期:2006-03-17

Received date: 2005-11-02, revised date: 2006-03-17

基金项目:国防预研基金项目(51402030105DZ0177)

作者简介:武斌(1980-),男,山西汾阳人,博士生,主要从事红外弱小目标检测跟踪和数据融合等方面的研究.

式中 $F(x, y, k)$ 表示图像上任意点 (x, y) 在第 k 帧的灰度值, $F_T(x, y, k)$ 为目标在第 k 帧经过点 (x, y) 处的灰度值, $F_C(x, y, k)$ 为点 (x, y) 处背景的灰度值, $N(x, y, k)$ 为噪声灰度值, k 为图像序列的帧数.

在红外序列图像中, 相邻两帧间目标的亮度和尺寸变化较小, 每帧目标大小一般占几个像素, 而相邻帧间背景的变化量也很小, 相对于目标的运动量可以忽略不计, 故背景灰度 $F_C(x, y, k)$ 在连续 M ($M \leq 10$) 帧内通常认为是恒定的. $N(x, y, k)$ 是传感器及电路产生的噪声总和, 在时间上可认为是服从高斯分布的白噪声^[4]. 当有小目标经过图像中的某个像素点时, 会引起灰度值的瞬间起伏, 所对应像素灰度值随时间变化信号具有类似“脉冲”的形状^[4], 而没有目标经过的背景像素灰度则是缓慢变化的.

由上分析, 红外图像中弱小运动目标的检测可转化为高斯噪声中非高斯瞬态信号的检测, 而三阶累积量可以有效地抑制高斯噪声并检测弱瞬态信号^[5]. 因此, 本文尝试将三阶累积量引入红外图像弱小运动目标的检测中.

2 基于三阶累积量的检测方法

假设图像序列已经对齐, 根据目标与背景的特性, 在相邻几帧图像内, 像素点的背景灰度值变化较小, 可认为是常数. 因此可构造二元假设检验:

$$\begin{aligned} H_0: F(x, y, k) &= N(x, y, k) \\ H_1: F(x, y, k) &= T(x, y, k) + N(x, y, k) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $F(x, y, k)$ 表示图像中像素点 (x, y) 处灰度随时间变化的一维信号, $T(x, y, k)$ 表示像素点 (x, y) 处目标像素灰度随时间变化的信号, 为非高斯信号, 且与高斯噪声 $N(x, y, k)$ 相互独立. 设 $F(x, y, k)$ 的均值为零, 则其三阶累积量^[5] 定义为:

$$\begin{aligned} c_{3F}(\tau_1, \tau_2) &= E\{F(x, y, k)F(x, y, k + \tau_1)F(x, y, k + \tau_2)\} \\ &= c_{3T}(\tau_1, \tau_2) + c_{3N}(\tau_1, \tau_2) \end{aligned} \quad (3)$$

因为 $N(x, y, k)$ 为高斯噪声, 有 $c_{3N}(\tau_1, \tau_2) = 0$, 所以式(3)简化为 $c_{3F}(\tau_1, \tau_2) = c_{3T}(\tau_1, \tau_2)$, 由于 $|c_{3F}(\tau_1, \tau_2)|$ 在原点取最大值^[5], 即

$$|c_{3F}(0, 0)| \geq |c_{3F}(\tau_1, \tau_2)| \quad (4)$$

若采用零滞后的三阶累积量作为检测统计量, 则有

$$|c_{3F}(0, 0)| = E\{F^3(x, y, k)\} \begin{cases} = 0 \text{ 时, 判为 } H_0 \\ > 0 \text{ 时, 判为 } H_1 \end{cases} \quad (5)$$

实际中, 由于估计三阶累积量只能利用有限长

度的数据, 导致高斯噪声的三阶累积量估计并不为零, 而与噪声的方差成正比, 与数据长度成反比. 因此, 根据实际图像情况, 采用下面改进的检测方法, 如图 1 所示:

一般, 对于平稳信号的高阶累积量估计, 在满足高阶遍历的条件下, 通常用时间平均代替统计平均, 因此, 选的样点数越多, 估计精度越高. 然而, 根据实际红外目标经过的像素点灰度值的瞬态起伏特性, 实际图像的像素点灰度值由背景产生的一个平稳分量叠加可能的目标瞬态起伏组成. 对于平稳分量的三阶累积量估计需要较长样点数, 但是对于瞬态起伏, 由于其持续时间很短, 在估计其三阶累积量的时候引入一个较短的时间窗 M . 零均值信号的三阶累积量等于其三阶矩, 因此实际中一般直接估计信号的三阶矩. 首先必须对输入图像数据去均值处理. 为了减小图像序列不能完全对齐产生的影响, 我们对点 (x, y) 处的灰度值用其 3×3 邻域的灰度均值代替. 常规的均值估计方法需要全部数据记录, 这样会产生检测延迟. 为了实现实时检测, 本文采用逐帧更新、数据重叠的均值估计法, 即滑动时间窗, 用窗口内 M 帧样本的均值作为下一帧的均值, 进行去均值处理, 然后对下一帧图像中的每个像素点进行三阶累积量的估计并检测. 具体检测方法如下:

步骤 1: 序列均值的估计

(1) 计算第 i 帧某一像素点 (x, y) 的灰度值:

$$F_s(i) = F_s(x, y, i) = \frac{1}{9} \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 F(x+m, y+n, i) \quad (6)$$

(2) 取滑动窗长为 M , 计算该像素点在时间剖面上的均值估计序列

$$\bar{F}_s(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=k-M}^{k-1} F_s(i), \quad k = M, M+1, \dots, \text{并置 } \bar{F}_s(k) = \bar{F}_s(M), \quad k = 1, 2, \dots, M,$$

经过去均值运算得到零均值序列 $\tilde{F}_s(k) = F_s(k) - \bar{F}_s(k), k = 1, 2, \dots, M, \dots$

步骤 2: 三阶累积量估计与检测

对于零均值图像序列 $\{\tilde{F}_s(k), k = 0, 1, \dots, M-1\}$, 第 i 帧像素点 (x, y) 灰度值的三阶累积量估计为

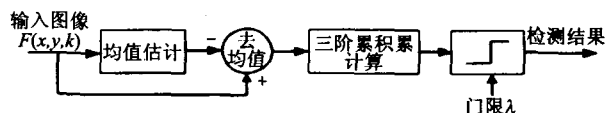


图 1 基于三阶累积量的检测流程图
Fig. 1 Detection flowchart based on third-order cumulant

$$\hat{c}_{3\bar{F}_s}(0,0) = \frac{1}{M} \sum_{k=i-M}^{i-1} \bar{F}_s^3(k) \quad (7)$$

由分析可知^[6], $\hat{c}_{3\bar{F}_s}(0,0)$ 近似服从正态分布, 即

$$\hat{c}_{3\bar{F}_s} \sim N[c_{3\bar{F}_s}, \sigma^2(\hat{c}_{3\bar{F}_s})]$$

其中 $\hat{c}_{3\bar{F}_s} = \hat{c}_{3\bar{F}_s}(0,0)$, $c_{3\bar{F}_s} = c_{3\bar{F}_s}(0,0)$,

$$\sigma^2(\hat{c}_{3\bar{F}_s}) = E\{| \hat{c}_{3\bar{F}_s}(0,0) - c_{3\bar{F}_s}(0,0) \|^2\}$$

在 H_0 假设下, 有 $c_{3\bar{F}_s} = c_{3\bar{N}_s} = 0$,

$$\sigma^2(\hat{c}_{3\bar{F}_s}) = E\{| \hat{c}_{3\bar{F}_s} \|^2\} = \sigma^2(\hat{c}_{3\bar{N}_s}) \quad (8)$$

其中, $\hat{c}_{3\bar{N}_s}$ 为高斯噪声的三阶累积量估计.

在 H_1 假设下, 有 $c_{3\bar{F}_s} = c_{3\bar{T}_s}$, $\hat{c}_{3\bar{F}_s} = \hat{c}_{3\bar{T}_s}$,

$$\sigma^2(\hat{c}_{3\bar{F}_s}) = E\{| \hat{c}_{3\bar{F}_s} - c_{3\bar{F}_s} \|^2\} = \sigma^2(\hat{c}_{3\bar{T}_s}) \quad (9)$$

其中, $\hat{c}_{3\bar{T}_s}$ 为目标信号的三阶累积量估计.

因此, 检测目标等价于判决统计量 $\hat{c}_{3\bar{F}_s}$ 是服从正态分布 $N[0, \sigma^2(\hat{c}_{3\bar{N}_s})]$ 还是 $N[c_{3\bar{T}_s}, \sigma^2(\hat{c}_{3\bar{T}_s})]$, 可转化为似然比检测. 由于实际中, 分布参数 $c_{3\bar{T}_s}$ 、 $\sigma^2(\hat{c}_{3\bar{N}_s})$ 和 $\sigma^2(\hat{c}_{3\bar{T}_s})$ 未知, 确定检测阈值比较困难. 本文采用归一化累积量 $\bar{c}_{3\bar{F}_s} = (\hat{c}_{3\bar{F}_s})^2 / \sigma^2(\hat{c}_{3\bar{F}_s})$ 作为检验统计量, 其中

$$\sigma^2(\hat{c}_{3\bar{F}_s}) \approx \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} (\bar{F}_s^3(k) - \hat{c}_{3\bar{F}_s})^2$$

则随机变量 $\hat{c}_{3\bar{F}_s} / \sigma(\hat{c}_{3\bar{F}_s})$ 近似服从正态分布, 其均值为 $c_{3\bar{F}_s} / \sigma(\hat{c}_{3\bar{F}_s})$, 方差为 1.

由此可知, 在 H_0 假设下, $\bar{c}_{3\bar{F}_s}$ 近似服从自由度为 1 的中心 χ^2 分布; 在 H_1 假设下, $\bar{c}_{3\bar{F}_s}$ 近似为服从自由度为 1 的非中心 χ^2 分布, 非中心参数为 $(\hat{c}_{3\bar{F}_s})^2 / \sigma^2(\hat{c}_{3\bar{F}_s})$. 于是, 假设检验简化为经典的 χ^2 检验, 即

$$\begin{cases} \bar{c}_{3\bar{F}_s} < \lambda : H_0 \\ \bar{c}_{3\bar{F}_s} \geq \lambda : H_1 \end{cases} \quad (10)$$

其中, 检测阈值 λ 可由给定的虚警概率 P_{fa} 查 χ^2 分布表得到.

步骤 3: 检测结果与显示

将第 i 帧某一像素点 (x, y) 的统计检验量 $\bar{c}_{3\bar{F}_s}$ 与检测阈值 λ 比较, 大于或等于 λ 的像素灰度值置 1, 小于 λ 的像素置 0, 可得二值化像素

$$F_B(x, y, i) = \begin{cases} 0, & \bar{c}_{3\bar{F}_s} < \lambda \\ 1, & \bar{c}_{3\bar{F}_s} \geq \lambda \end{cases} \quad (11)$$

遍历检测第 i 帧图像中的所有像素点, 从而生成了二值图像.

步骤 4: 逐帧更新

将窗口 M 滑动, 计算第 $i+1$ 帧的检验统计量并判决比较, 得到第 $i+1$ 帧的二值图像, 显示检测结果, 以此类推, 可以对后续图像帧做相同处理, 最后画出目标的运动轨迹图.

3 实验与分析

本文采用局部信杂比 (SCR) 来衡量算法的性能, 其定义如下:

$$SCR = 10 \log \frac{a^2}{\sigma^2} \quad (12)$$

其中, a^2 表示目标的强度, σ^2 表示局部背景杂波的均方值.

采用两组红外图像序列进行实验验证. 实验是在 P4-2.6GHz PC 机通过 MATLAB7.0 完成的.

3.1 实验一

在一组 95 帧 320×240 的真实红外图像序列中加入一个大小为 2×2 的目标并以每帧 1 个像素的速度运动, 该目标作直线运动并穿过云层, 图 2 为序列中的某一帧. 分别用本文的算法和管道滤波法在不同局部信杂比下对目标进行检测, 在恒虚警 $P_{fa} = 10^{-4}$ 的条件下, 本文算法中检测阈值 λ 为 78.6, 窗口 $M=5$. 图 4 为两种方法在 SCR 为 1.5 情况下的检测目标轨迹. 表 1 为两种方法在不同局部信杂比下的检测概率.

为了比较本文方法在不同滑窗长度下的检测性能, 在相同的实验条件下, M 分别取 5 和 15, 对仿真目标进行检测. 表 2 为两种情况下的检测性能对比.

表 1 两种方法在不同信杂比下的检测概率

Table 1 Probabilities of detection obtained by two algorithms with different SCRs

方法	SCR	2.0	1.5	1.0	0.5
管道滤波法		88.4%	84.2%	81.1%	67.4%
本文方法		96.3%	93.1%	91.5%	89.7%



图2 序列1的单帧图像
Fig.2 One frame of sequence.1



图3 序列2的单帧图像
Fig.3 One frame of sequence.2

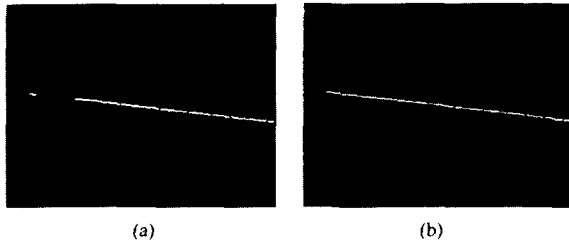


图4 两种方法在信杂比为 1.5 下的检测目标轨迹 (a)管道滤波法 (b)本文方法

Fig.4 The target's trajectories obtained by two algorithms with SCR = 1.5 (a) the pipeline filter algorithm (b) the proposed algorithm

表2 不同窗长 M 时的检测性能对比

Table 2 Comparison of detection performance with different Ms

窗长 M	检测概率(SNR = 1.5)	单帧检测用时(s)
5	93.1%	0.33
15	94.5%	1.05

从图4可以看出,在信杂比为 1.5 的情况下,管道滤波法在一般强度的云层中可以检测目标,但在强云层杂波背景下连续多帧漏检目标,无法可靠检测,见图4(a)中的断线部分,而本文方法则可以检测到目标通过云层时像素点灰度值产生的微小变化,从而能可靠检测目标.由实验可知,在不同信杂比下,本文方法的检测概率高于管道滤波法,特别是在强杂波背景下,仍然能保持较高的检测概率.同时,从表2可以看出,对于不同的窗长 M,检测概率提高不多,但时间却明显增加.因此,本文选 5~8 个点估计三阶累积量对检测性能影响不明显,同时,算法计算量相应减少,有利于实际应用.

3.2 实验二

本实验采用 95 帧的 320 × 240 实测红外图像序列,恒虚警 $P_{fa} = 10^{-4}$,检测阈值 λ 为 78.6,窗口 $M = 5$,实际检测帧数为 90 帧.图3为红外图序列中的某一帧,图中方框所示为两个真实目标.左边的目标 1 在云层中飞行,被云层遮挡,其信杂比很低,远小于 1;右边的目标 2 云层遮挡不严重,其信杂比等于 0.8.对于目标 1,90 帧中漏检 11 帧,正确检测概率为 87.8%;目标 2 漏检 4 帧,正确检测概率为 95.6%.图5(a)所示为第 65 帧的检测结果,图5(b)所示为两个目标的轨迹图.

由实验可知,本文方法对于真实环境下的目标仍然具有较高的检测概率,尤其适用于强杂波背景下,由于云层边缘抖动,会有虚警点出现,可以

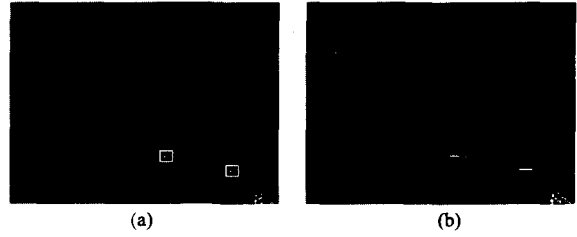


图5 实测红外图像序列实验结果图 (a)第 65 帧检测结果 (b)目标轨迹

Fig.5 Experimental results of real IR image sequence (a) Detection result of the 65th frame (b) The targets' trajectory

通过建立目标的运动轨迹将其排除.

4 结语

本文提出了一种基于三阶累积量的红外弱小运动目标检测新方法.该方法首先利用三阶累积量估计中的去均值处理,有效地抑制了强杂波在各像素点上较大的平稳分量,然后利用三阶累积量能敏感察觉细小变化并抑制高斯噪声的特点,实现了弱小运动目标的检测,同时图像数据逐帧更新,减少了运算量.实验结果表明该方法不仅能够可靠地检测出强背景杂波下的弱小运动目标,而且还具有多目标检测的能力,因此具有良好的应用前景.

REFERENCES

[1] DONG Wei-Ke, XIANG Jian-Yong, YUAN Sheng-Chun. A precisely tracking method of IR weak target [J]. *LASER&INFRARED* (董维科, 向健勇, 袁胜春. 一种红外弱小目标精跟踪方法. *激光与红外*), 2005, 35(3): 184 - 186.

[2] ZHOU Feng-Qi, DI Xiao Guang, ZHOU Jun. Method of infrared image denoising based on stationary multiwavelet transform [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (周凤岐, 遼小光, 周军. 基于平稳多小波变换的红外图像噪声抑制方法. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(2): 151 - 155.

[3] SUN Wei, XIA Liang-Zheng. Infrared target segmentation algorithm based on morphological method [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孙伟, 夏良正. 一种基于形态学的红外目标分割方法. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(3): 233 - 236.

[4] Tzannes A P, Brooks D H. Detection small moving objects using temporal hypothesis testing [J]. *IEEE Trans on AES*. 2002, 38(2): 570 - 585.

[5] Nikias C L, Athina P. *Petropulu. Higer-order spectra analysis* [M]. NJ; Prentice-Hall. INC. 1993.

[6] Giannakos G B, Tsatsanis M K. Signal detection and classification using matched filtering and higher-order statistics [J]. *IEEE Trans. Acoustics, Speech, Signal Processing*, 1990, 38: 1284 - 1296.