

基于小波变换与像素灰度值变化的点目标探测*

范宏深^{1,2},倪国强¹,王新明³

(1. 北京理工大学光电工程系,北京 100081;2. 二炮装备研究院,北京 100085;
3. 中国航天科工集团公司第二十五研究所,北京 100854)

摘要:当成像系统与反舰导弹的运动方向在同一条直线上时,无法采用基于运动轨迹分析的时间滤波算法。针对这一问题,提出了一种基于小波变换的空间滤波与基于像素灰度值变化检测的时间滤波混合算法进行点目标探测。试验用的图像采用实际的背景图像与模拟的点目标信号相结合。试验表明该算法具有良好的探测精度和灵敏度以及低虚警率。

关键词:点目标; 探测; 时空滤波; 小波分析; 反舰导弹

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2004)05-0493-03

Point target detection based on wavelet and pixel value changing*

FAN Hong-shen^{1,2}, NI Guo-qiang¹, WANG Xin-ming³

(1. Department of Photo-electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Institute of China Second Artillery Force, Beijing 100085, China;
3. The 25th Institute, China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100854, China)

Abstract: When the impending antiship cruise missile's motion vector aligns with the axis of IR detection system, it is difficult to detect and track it by its trace analysis. A novel spatio-temporal filtering method is presented, which employs wavelet analysis and pixel value changing measurement. The images used in the experiments are composed of some real pictures and man-made point target signals, and the method is proved to be with high accuracy and sensitivity and low false alarm rate.

Key words: Point target; Detection; Spatio-temporal filtering; Wavelet analysis; Antiship cruise missile

0 引言

在红外搜索与跟踪系统(IRST^[1])进行较远距离

探测时,反舰导弹的图像通常为小目标或点目标。以NightVision公司的红外热像仪为例,其像元数为640×486,窄视场为3.05°×2.32°。当成像系统的观测方向与来袭导弹的飞行方向在同一直线上时,导弹

收稿日期:2003-11-01; 修订日期:2004-02-01

* 基金项目:目标与环境光学特性国防重点实验室基金资助项目(51476020101BQ0101;51476040102BQ0101)

作者简介:范宏深(1964-),男,北京顺义区人,高级工程师,博士,研究方向为光电成像、模式识别和多传感器数据融合。

的可观测截面很小。对于一个观测截面尺寸为 1 m 的反舰导弹,可以算出,当导弹距离 IRST 为 12 km 以内时为小目标,距离更远时为点目标。目前 IRST 系统的探测距离一般都大于 12 km,例如,法国的舰载 VAMPIR IRST 系统探测亚音速掠海飞行导弹的距离为 16 km,探测超音速导弹的距离为 27 km;荷兰“天狼星”IRST 系统对亚音速掠海导弹的探测距离是 21 km,对超音速掠海导弹的探测距离是 35 km。因此可以说,对反舰导弹的探测主要是对点目标的探测。

点目标探测主要采用时空滤波器法。空间滤波器用于探测疑似点目标,时间滤波器用来进一步从疑似点目标中筛选出真正的点目标。用于点目标探测的空间滤波器主要有模板匹配滤波器^[2]和自适应阈值滤波器^[3]等;用于点目标探测的时间滤波器主要有基于膨胀运算的相关滤波器等^[4]。前者空间滤波算法对信背比非常低的点目标探测效果还不够理想,后者时间滤波器算法无法过滤掉像航标灯之类的假目标。本文提出了一种基于小波变换的空间滤波器和基于像素值变化检测的时间滤波器。空间滤波器在不采用帧累计的条件下,在单帧图像中可以探测到信背比(目标像素值与其邻域背景像素均值之比)低达 1.1:1 的点目标,并且除了要探测的点目标外,选中的虚假目标较少或基本没有。时间滤波器可以排除掉航标灯等类似反舰导弹的点目标。

1 基于小波变换的空间滤波器

设有图像 $S(i, j)$, $i \in (1, M)$, $j \in (1, N)$,其中含有点目标 P ,其坐标为 (i_p, j_p) 。由于点目标只占有图像中的一个像素,所以在探测并实施跟踪时没有必要研究整个图像,只需重点研究目标点所在的行和列。过点 (i_p, j_p) 得到图像 $S(i, j)$ 的第 i_p 行和第 j_p 列两个向量:

$$\begin{aligned} I_p &= \{S(i_p, j)\} & j &= 1, \dots, N \\ J_p &= \{S(i, j_p)\} & i &= 1, \dots, M \end{aligned} \quad (1)$$

对 I_p 和 J_p 进行一维连续小波变换^[5]:

$$\begin{aligned} I_w &= \{I_w(i_p, j)\} = \left\{ \sum_k \int_k^{k+1} I_p \psi(x-j) dx \right\} & j &= 1, \dots, N \\ J_w &= \{J_w(i, j_p)\} = \left\{ \sum_k \int_k^{k+1} J_p \psi(x-i) dx \right\} & i &= 1, \dots, M \end{aligned} \quad (2)$$

其中 ψ 为 Harr 小波基函数。以 I_w 上 j_p 点、 J_w 上 i_p 点为中心向左右各截取宽度为 a (试验中取 $a=10$) 的两个数组:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \{I_w(i_p, j^*)\} & j^* &= j_p - a, \dots, j_p, \dots, j_p + a \\ \mathbf{B} &= \{J_w(i^*, j_p)\} & i^* &= i_p - a, \dots, i_p, \dots, i_p + a \end{aligned} \quad (3)$$

式中 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 为描述点目标空间状态的两个特征矢量。定义 \mathbf{A} , \mathbf{B} 的数组乘为:

$$\mathbf{C} = \mathbf{A} \wedge \mathbf{B} = \{I_w(i_p, j^*) J(i^*, j_p)\} \quad (4)$$

试验表明, \mathbf{C} 对背景具有抑制作用,通过求 \mathbf{C} 的方差与均值,设定一个自适应阈值^[3]就可以在 \mathbf{C} 中探测到点目标的位置,从而推算出点目标在图像中的位置。

2 基于像素灰度值变化的时间滤波器

经过对图像进行上述的空间滤波后,探测到的点目标可能是假目标,如航标灯等,也可能是向外飞行的目标。目标的真假可以通过像素值变化检测(称之为时间滤波器)进一步判断。因为已经知道了点目标的位置,所以就没有必要关注整个图像,而可直接对点目标信号 $s(t)$ 进行时间滤波。 $s(t)$ 与传感器至目标之间的距离 $R(t)$ 的平方成反比。设点目标在相邻两帧图像中的像素值分别为 $s(t+1)$ 和 $s(t)$,则有:

$$\frac{s(t+1)}{s(t)} = \left(\frac{R(t)}{R(t+1)} \right)^2 \approx 1 + 2\Delta R/R(t) \quad (5)$$

设导弹的初始探测距离为 $R(t)=20$ km,信号处理器采用 12 bitA/D 转换器,图像处理速度为 30 帧/s,导弹(假定是黑体辐射)速度为 300 m/s,则导弹在相邻两帧图像采样的时间间隔内飞行了 $\Delta R=10$ m,则公式(5)变为:

$$s(t+1) = 1.001s(t) \quad (6)$$

当 $s(t) > 1000 \text{ bit}$ 时, $s(t+1) - s(t) > 1 \text{ bit}$, 则在相邻两帧图像中就可以测出点目标像素值的变化。从图 1 可以看出, 点目标像素值从 1000 bit 增长到 1030 bit 需要 30 帧图像的采样时间。飞鸟、航标灯等目标图像的像素值在这么短的时间间隔内基本上是不变的。因此, 通过像素值变化检测可以区分反舰导弹信号与假目标信号。若点目标的像素值小于 1000 bit, 则需要预放大处理。

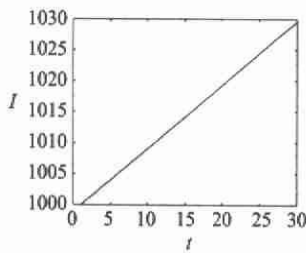


图 1 黑体辐射信号随时间(以帧为单位)变化曲线
Fig. 1 The relationship between time and the blackbody's radiant intensity



图 2 视场中有甲板 and 飞机时的点目标探测
Fig. 2 Point target on the background of ship-board and airplane

探测前后图像中的点目标无法看到, 所以在图中标记的点目标都是在探测到以后重新用高亮度标记的, 而且标记的点目标面积比实际大, 以便观看)。从图 2 ~ 图 6 还可以看出, 该空间滤波算法对甲板上飞机的发动机喷管、有阳光散射的海水以及海面或天空中其他物体都有抗干扰能力。另外还随机找了许多没有点目标的背景图像进行了试验, 结果都没有误探测出点目标, 这说明该算法的虚警率比较低。

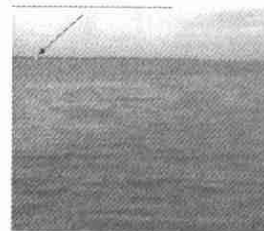


图 5 对来自海岸线的点目标的探测
Fig. 5 Detection of point target coming from coastline



图 6 以载有飞机的甲板为背景的点目标探测
Fig. 6 Detection of point target on the background of shipboard and airplane

3 仿真试验

3.1 空间滤波试验

试验中采用的图像都是实拍的海上背景。图 2 ~ 图 6 是选出的有代表性的 5 张图像, 每幅图像中人为加入了一个点目标, 点目标像素灰度值比其周围像素值高出 10%, 这些点目标都唯一地被探测到(由于



图 3 以反射阳光的海水为背景的点目标探测
Fig. 3 Point target on the background of sun-cluttering



图 4 以甲板为背景时的点目标探测
Fig. 4 Point target on the background of ship-board

3.2 时间滤波试验

仿真试验采用的图像是近距离观测的飞行导弹, 导弹的像素值足够大, 与微弱信号放大后的效果相同, 从相邻两帧图像可以看出信号强度的变化, 从多帧图像可以看出目标像素值变化的趋势。

试验所用的图像是导弹由远及近连续 42 帧的飞行图像, 如图 7 所示。导弹的像素强度变化曲线如图 8 所示。

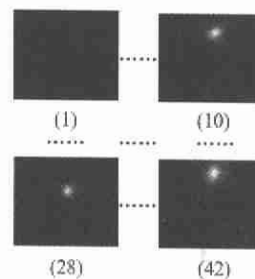


图 7 连续的 42 帧导弹图像
Fig. 7 Continuous 42 frames flying missile images

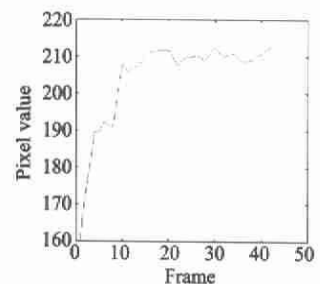


图 8 42 帧导弹图像像素灰度值随距离的变化曲线
Fig. 8 The relationship between the distance and the missile's radiant intensity in 42 frames

式 PC 的出现,为研制新型便携式红外图像处理系统提供了一种新的解决方案。本设计在 PC-104 的硬件平台上,采用 PCI 9054 和 FPGA 构建了 NUC 卡,实现了一个硬软件功能易于扩展的红外图像处理系统。在该系统基础上,可以根据实际应用要求设计相应的上层软件,构建成红外检测、红外跟踪等各种系统。目前已利用该红外图像处理系统,分别构建了几种红外应用系统。由于采用 PC-104 plus 主机和 Win98 操作系统,使系统具有良好的人机界面,特别适用于需要人机交互的应用。此外,由于开发程序使用的宿主机和最终的目标机兼容,也给开发、调试和维护工作带来很大方便。

考虑到 Win98 对硬件资源有较高要求,同时实时性方面又存在不足,下一步的工作准备用 Window CE 操作系统取代 Win98。

参考文献:

[1] PC/104 Consortium. PC/104-Plus Specification Version 1.1

(上接第 495 页)

该图说明两个问题:

- (1) 目标的像素值是随距离变化的,目标的像素值在 30 帧采样时间内增加了 50 bit,如图 8 所示;
- (2) 像素值增加较快,目标可能是来袭导弹。

4 结 论

本文研究的空间滤波器可以在多种复杂背景图像中探测到点目标信号。当信背比大于 1.1 时,在所用空间滤波器通常可探测到试验图像中惟一的点目标,该目标可能是静止目标、来袭目标或远去的目标,通过进一步采用基于像素灰度值变化检测的时间滤波器可以判断该目标是否是来袭目标。该方法适于对反舰导弹的探测,因为通常情况下反舰导弹的来袭方向总是与红外成像系统的光轴重合或近似重合,使得点目标的位置在图像中基本不变。

点目标在很远时,大气的扰动使得探测到的点目标的辐射强度存在起伏,即“闪烁”现象。但目标辐射强度的变化趋势是增强的。在进一步的研究中,将同时利用点目标信号变化检测和闪烁检测^[6]来进行时

[M]. PC/104 Consortium, 1997.

- [2] PCI Special Interest Group. PCI Local Bus Specification Production Version Revision 2.1[M]. PCI Special Interest Group, 1995.
- [3] PLX Technology Inc. PCI 9054 Data Book Version 2.0[M]. PLX Technology Inc, 1999.
- [4] Scribner D A, Sarkady K A, Caulfield J T, et al. Nonuniformity correction for staring IR focal plane arrays using scene-based techniques[A]. Infrared Detectors and Focal Plane Arrays, SPIE[C]. 1990,1308. 224-233.
- [5] Hardie R C, Hayat M M, Armstrong E, et al. Scene-based nonuniformity correction using video sequences and registration [J]. Applied Optics, 2000, 39(8): 1241-1250.
- [6] Milton A F, Barone F R. Influence of nonuniformity on infrared focal plane array performance[J]. Optical Engineering, 1985, 24(5): 855-862.
- [7] 陈宝国,郑志伟,黄士科,等. 利用 FPGA 实现红外焦平面器件的非均匀性校正[J]. 红外与激光工程, 2000, 29(4): 55-57.
- [8] 王钰,陈钱,殷德奎,等. 实时红外图像非均匀性校正技术研究 [J]. 红外与毫米波学报, 1999, 18(2): 151-155.

间滤波。

参考文献:

- [1] De Jong A. IRST and its Perspective [A]. Proceeding of SPIE on Infrared Technology XXI[C]. 1995, 2552. 206-213.
- [2] Reed IS, Gagliardi R M, Stotts L B. A recursive moving-target-indication algorithm for optical image sequences [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1990, 26(3): 434-440.
- [3] Zhu Z, Liang H, Pan A, et al. Detection and acquisition of small targets with low signal-to-clutter ratio[A]. Proceeding of SPIE on Signal and Data Processing of Small Targets[C]. 1999, 3809. 564-569.
- [4] 熊辉,沈振康. 低信噪比抖动红外点目标的检测[J]. 国防科技大学学报,1998,20(2): 54-59.
- [5] Burke Hubbard B. The world according to wavelets [M]. Wellesley, MA; AK Peters, Ltd, 1995.
- [6] De Jong AN, Winkel H, Kemp RAW. Encountering bird alarms in full-stare IRSTs [A]. Proceeding of SPIE on Infrared Technology and Applications XXVI[C]. 2000, 4130. 700-709.