第42卷 第1期
2010年1月

哈尔滨工业大学学报
JOURNAL OF HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Vol. 42 No. 1
Jan. 2010

飞行目标的光谱辐射强度与梯度组合识别算法

操乐林[1]，张 珩[2]，张 伟[1]，侯晴宇[1]

(1. 哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心，哈尔滨 150001，houqingyu@126.com;
2. 中科院 力学研究所，北京 100080)

摘 要: 利用人造飞行目标相邻波段光谱辐射强度连续性特点，提出了一种多光谱辐射强度和梯度相组合的目标识别快速算法. 该算法首先对多光谱图像进行高通滤波实现背景抑制，而后以残余图像符合高斯统计分布为假设前提，建立了强度阈值与光谱梯度阈值的概率密度函数，最后利用 3σ 准则确定强度阈值以达到噪声中目标和诱饵的检测，确定光谱梯度阈值对二者进行识别，这种依据数据统计特性进行的双阈值确定方法增强了算法的自适应性能. 利用此算法进行了强噪声下的目标识别仿真试验，表明了算法的有效性.

关键词: 目标识别; 多光谱; 辐射强度; 光谱辐射梯度

中图分类号: TN21 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2010)01-0033-04

Recognition algorithm for flight targets with intensity and gradient combination in multispectral image

CAO Le-lin[1], ZHANG Heng[2], ZHANG Wei[1], HOU Qing-yu[1]

(1. Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, houqingyu@126.com; 2. Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: In this paper a simple algorithm for flight targets recognition with combination of radiant intensity and gradient in multispectral image is presented by using the continuous characteristics of radiant intensity of adjacent infrared band for man-made flight targets. This algorithm filters the multispectral image with a high-pass filter to suppress the background. The probability density functions (PDFs) of intensity threshold and gradient threshold of spectrum radiation are constructed based on the assumption that the retained image follows the Gaussian distribution. And based on these PDFs, the 3σ rule is obtained to detect and identify the target and bait. The dual thresholds based on the statistical characteristic of data enhance the adaptive capability of the proposed algorithm. The simulation on targets recognition with the proposed algorithm example in strong noise is conducted, and results show the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: target recognition; multi-spectrum; radiant intensity; gradient of spectrum radiation

飞行目标识别及其干扰物分离是红外光学成像探测领域最具挑战性的难题之一. 首先就是干扰物与真实目标可能具有相同的几何特征和运动特征. 其次是目标相对于光学探测的成像窗口，会从单点像素直至充满整幅的成像画面，这就给快速而有效的识别带来很大困难. 鉴此，Yu 等[1]提出了一种以广义似然比检测(GLRT)为基础，进行二值假设检验的异常检测算法. Chang 等[2]将 Projection Pursuit (PP) 算法引入了高光谱目标识别中，可适合于高光谱微小目标的异常检测. 武春风等[3]提出了一种基于红外多光谱图像相关性的自动目标识别算法. 冯志庆等[4]运用神经网络概念给出了一个多周期模式识别推理模型.

本文在对飞行目标、诱饵及其背景红外辐射特性的深入分析基础之上，提出了以多光谱辐射强度与梯度进行组合判别的飞行目标实时识别算法，以期具有更高的识别率和更为快捷的处理

收稿日期: 2008-07-01.
作者简介: 操乐林(1970—)，男，博士研究生;
张 伟(1962—)，男，教授，博士生导师.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

能力.

1 目标光谱辐射特性

诸多研究结果表明[1-9],环境背景、真实飞行目标以及干扰物(或称诱饵)的光谱辐射、反射特性在不同的波段内存在显著差异.

与诱饵目标相比,真实飞行目标具有高级飞行和执行特定任务的能力,因而在系统组织上必然具有更高的复杂度和物质组成的多样性特点,这决定了它的热辐射光谱含量要比起一般的背景或假目标更为宽广和丰富的多. 这就意味着,真实目标在相应的各个波段光强度分布上,会有较好的连续性和过渡性. 相比之下,诱饵目标除基本几何特征和运动特征外,其物质组成和组织结构相对简单,相应的辐射光谱连续性要差得多,也即光谱的变化要剧烈得多[2-3].

此外,由于飞行目标及其干扰物与背景对光谱的反应特性差异,将使得飞行目标及伴飞诱饵目标的光谱辐射强度要大于一般背景.

2 光谱辐射强度与梯度组合识别算法

通过空间高通滤波去相关处理去除多光谱图像上的非平稳红外背景杂波,残余图像中像素可以分为三类,分别为目标、诱饵以及噪声. 光谱强度与梯度组合识别算法分为两个阶段,首先为目标检测过程,从噪声图像中提取目标以及诱饵;而后为目标识别过程,利用光谱信息差异对二者进行分类.

2.1 目标检测过程

设背景抑制后的多光谱图像具有 K 个波段,每个波段图像为 $n \times m$ 个像素,令 $X_k(k = 1,2,3,\cdots,K)$ 代表第 k 个波段的灰度图像,即

$$X_k = \{x_{i,j}^k\},$$

其中 $x_{i,j}^k$ 代表 (i,j) 像素点第 k 个光谱波段的光谱辐射强度值 $(i = 1,2,\cdots,n;j = 1,2,\cdots,m)$.

令场景的全波段红外图像表示为

$$\underline{X} = \{\hat{x}_{i,j}\} = \{\sum_{k=1}^{K} x_{i,j}^k\}$$

取一个适当的常数 $g_{\min}$,构建可疑目标的辐射强度判据为

$$\hat{x}_{i,j} \geqslant g_{\min}, \tag{1}$$

否则将该点视为噪声像素.

2.2 目标识别过程

进一步地,定义第 (i,j) 像素点处 $K-1$ 个光谱辐射梯度值及其最大值为

$$\delta_{i,j}^k = x_{i,j}^{k+1} - x_{i,j}^k, k = 1,2,\cdots,K-1,$$

$$\hat{\delta}_{i,j} = \max\{\delta_{i,j}^1,\delta_{i,j}^2,\cdots,\delta_{i,j}^{K-1}\}.$$

取 $\delta_{\max}$ 为目标光谱辐射梯度的上界阈值,从而可知第 (i,j) 像素为可疑目标像素的梯度判据为

$$\hat{\delta}_{i,j} \leqslant \delta_{\max}. \tag{2}$$

根据式(1)及(2),给出相应的光谱辐射强度与梯度的组合判据:

$$\hat{x}_{i,j} \geqslant g_{\min},$$
$$\hat{\delta}_{i,j} \leqslant \delta_{\max}.$$

若第 (i,j) 像素的光谱辐射值 $\{x_{i,j}^1,x_{i,j}^2,\cdots,x_{i,j}^K\}$ 同时满足式(1)、(2),则该点为目标像素.

应当说明的是,对这个组合判据从物理意义上来解释,就是第 (i,j) 像素的辐射值必须有一定的强度,同时这个光谱辐射强度随光谱变化的梯度又不能太大. 显然,这个理解与第 1 节的分析相吻合.

分析而言,上述判据在应用上具有 3 个明显的优点.

1) 在存在背景噪声及探测系统噪声的情形下,可有效地避免梯度值很大,但强度却很小时的误判出现.

2) 由于对目标点在判别上都仅仅采用了比较型的计算步骤,所以它在处理速度方面的快捷性是十分明显的.

3) 由于对目标的识别是通过诸像点的计算而进行的,因此它无论是对于可成像目标亦或点目标都同样适用,只需要这个点目标具有必要的光谱辐射强度,即可进行相应的识别.

3 阈值自适应确定

需要注意的是,在运用上述组合判据时,要恰当地选取两个阈值 $(g_{\min},\delta_{\max})$,以期得到更好的识别效果. 一般地,可以在探测现场预先对使用环境和背景进行成像的各帧数据获取,并进行必要的计算,进而统计出探测视场内各相关物体(如树木、房屋等)和背景的辐射强度及梯度数据的分布情况,以此为依据,就可确定出这两个阈值常数. 但是在实际应用中,使用环境和背景等先验信息的获取存在很大困难,为了进一步增强算法的鲁棒性,本文提出了算法阈值的自适应确定方法.

3.1 $g_{\min}$ 的自适应确定

设背景抑制后的全波段红外图像 $\underline{X} = \{\hat{x}_{i,j}\}$ 的像素灰度满足零均值高斯分布,即

$$\hat{x} \sim N(0,\sigma_n^2),$$

则根据 3σ 准则可得像素 (i,j) 为噪声点时满足

$$P(|\hat{x}_{i,j}/\sigma_n| \leqslant 3) = 2\Phi(3) - 1 = 0.998\,7, \tag{3}$$

即像素 (i,j) 为噪声时,其灰度 $\hat{x}_{i,j}$ 以 0.998 7 的概

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

率满足

$$|\hat{x}_{i,j}| \leqslant 3\sigma_n.$$

选取 $g_{\min} = 3\sigma_n$，若 $x > g_{\min}$，则考察像素判别为目标或诱饵，反之判别为噪声.

式(3)中关于高斯噪声的均方差 σ_n 利用 Donoho和 Johnstone 提出的小波系数估计方法得到[10]

$$\sigma_n = MED/0.6745. \tag{4}$$

式中: MED 是对全波段图像小波分解后 $+45°$ 方向(HH)上小波系数幅度的中值. 即

$$MED = median\{|HH|\}.$$

所以有

$$g_{\min} = 4.4477 \cdot median\{|HH|\}. \tag{5}$$

3.2　$\delta_{\max}$的自适应确定

根据第一个阈值 $g_{\min}$ 可以遴选出表征目标和诱饵的像素，下面确定第二阈值 $\delta_{\max}$ 以对这些像素进行目标或诱饵的判别.

背景抑制后的每个子光谱波段的图像灰度满足零均值高斯分布，即

$$x_{i,j}^k \sim N(\mu^k, \sigma^{k^2}),$$

其中 μ^k 与 σ^{k^2} 分别为第 k 个光谱段图像灰度的均值与方差，σ^{k^2} 的估计的原理如式(4)所示. 对于利用 $g_{\min}$ 遴选出的拟目标像素(i,j)的光谱梯度为

$$\delta_{i,j}^k = x_{i,j}^{k+1} - x_{i,j}^k, \ (k = 1,2,\cdots,K-1),$$

由概率统计易得 $\delta_{i,j}^k$服从的统计分布为

$$\delta_{i,j}^k \sim N(\mu^{k+1} - \mu^k, \sigma^{(k+1)^2} + \sigma^{k^2}),$$

$\hat{\delta}_{i,j}$ 的分布函数为

$$F(\hat{\delta}_{i,j}) = \prod_{k=1}^{K-1} \Phi\left[\frac{\hat{\delta}_{i,j} - (\mu^{k+1} - \mu^k)}{\sqrt{\sigma^{(k+1)^2} + \sigma^{k^2}}}\right],$$

所以 $\hat{\delta}_{i,j}$ 的概率密度函数为

$$f(\hat{\delta}_{i,j}) = \frac{\mathrm{d}F(\hat{\delta}_{i,j})}{\mathrm{d}\hat{\delta}_{i,j}}.$$

由于目标的光谱曲线波动性远小于诱饵，所以仿照 3σ 规则，若令 $\hat{\delta}_{i,j}$ 为诱饵光谱梯度，则

$$P(\hat{\delta}_{i,j} > \delta_{\max}) = 1 - F(\delta_{\max}) = 0.9987, \tag{6}$$

解得阈值 $\delta_{\max}$.

4　仿真算例

以 1 个真实飞行目标和 4 个伴飞的诱饵为例，构造了一帧光谱探测窗口为 4 个波段(3 ~ 3.3 μm，3.7 ~ 4.3 μm，4.6 ~ 4.9 μm 及5 ~ 5.5 μm 划分)的点目标光谱强度成像数据序列(具体数值见图 1 所示). 仿真得到经过背景抑制以后的光谱图像灰度统计分布参数为均值 50、均方差 35 的高斯白噪声，四波段仿真图像如图 2 所示.

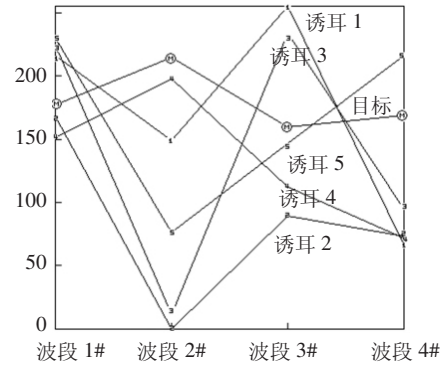
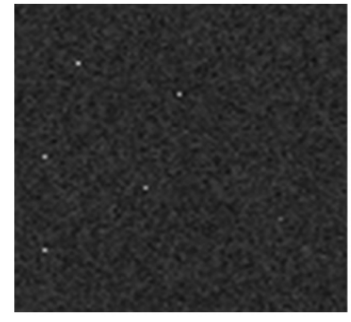
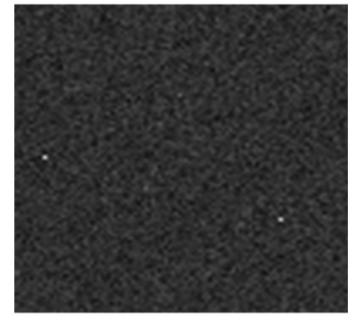


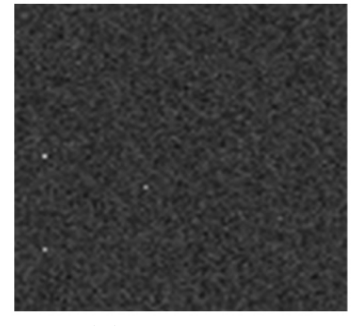
图 1　飞行目标及诱饵光谱辐射强度测量值



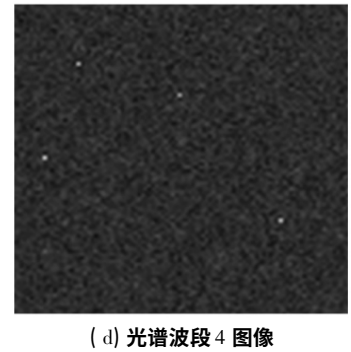
(a) 光谱波段 1 图像



(b) 光谱波段 2 图像



(c) 光谱波段 3 图像



(d) 光谱波段 4 图像

图 2　仿真多光谱图像

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

从图中可以明显看出有很多无规则的斑点存在,这说明所获得的光谱强度成像数据是处在较低的信噪比水平上. 图3 给出了利用图2 的多光谱图像获取的全波段图像,可见全波段图像有效的提高了目标和诱饵的信噪比,进而提高了其可探测性,为进一步的目标识别提供了有效基础.

图3 全波段图像

经过式(5) 和式(6) 计算得到的阈值($g_{\min}$, $\delta_{\max}$) 为(150,80) ,分别得到的目标检测和识别结果如图4 和图5 所示,图5 中用"○"标注的为识别得到的目标像素.

图4 目标和诱饵检测结果

图5 识别得到的目标位置

5 结 语

基于飞行目标相邻波段光谱辐射强度连续性特点,本文提出了一个通过对多光谱辐射强度与梯度相组合进行飞行目标识别的简捷算法. 算法通过场景的统计分布假设自适应确定目标检测和识别阈值,具有很强的自适应性能. 仿真实验证明了这一算法在解决飞行目标和诱饵识别问题上的有效性.

参考文献:

[1] YU X, HOFF L E, REED I S, *et al*. Automatic Target detection and recognition in multiband imagery: a unified ML detection and estimation approach [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(1): 143 – 155.

[2] REN H, CHANG C I. Automatic spectral target recognition in hyperspectral imagery [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(4): 1232 – 1249.

[3] 武春风,张伟,丛明煜,等. 基于红外多光谱图像相关性的自动目标识别算法 [J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(4): 265 – 268.

[4] 冯志庆,杨英慧,郭景富,等. 基于神经网络的点目标多光谱信息融合识别方法 [J]. 光学精密工程, 2003, 11(4): 412 – 415.

[5] 易尧华,梅天灿,秦前清,等. 高光谱影像中人工目标非监督提取的投影寻踪方法 [J]. 测绘通报, 2004 (2): 20 – 22.

[6] HOFF L E, EVANS J R, BUNNEY L E. Detection of targets in terrain clutter by using multispectral infrared image processing [J]. SPIE, 1991, 1481: 2554 – 2569.

[7] YU X, REED I S, STOCKER A D. Comparative performance analysis of adaptive multispectral detectors [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41 (8): 2639 – 2656.

[8] MILLER M I, FUHRMANN D R. Maximum likelihood narrow band direction finding and the EM algorithm [J]. IEEE Acoustics Speech and Signal Processing, 1990, 38 (9): 1560 – 1577.

[9] 黄士科, 张天序, 李丽娟, 等. 空空导弹多光谱红外成像制导技术研究 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35 (1): 16 – 20.

[10] DONOHO D L, JOHNSTON I M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage [J]. Biometrika, 1994, 81 (3): 425 – 455.

(编辑 张 宏)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net