

基于灰度相关的红外隐身效果评价方法研究

黄峰 汪岳峰 董伟 华文深

(解放军军械工程学院光学与电子工程系, 石家庄 050003)

摘要 提出了一种基于图像灰度相关算法的红外隐身效果评价方法. 通过对采用红外隐身措施前后目标图像的相关处理, 提取相关峰的峰显著系数、峰-相关能量比和峰-背景比这三个特征参量来定义红外隐身概率作为衡量红外隐身效果的客观评价指标. 采用人眼对红外热图进行判识的统计结果来确定红外隐身概率中各参量的统计权重, 从而使计算机图像处理方法所得结果与实际人眼的主观判识结果一致. 实验结果表明: 此方法适用于对地面典型军事目标的红外隐身效果进行客观评价.

关键词 红外隐身; 评价方法; 图像灰度相关; 相关峰

中图分类号 TN219 **文献标识码** A

0 引言

随着红外成像技术在军事领域中的广泛应用, 各种军事目标的生存受到严重威胁. 为此, 以降低和削弱敌方红外探测效果为目的的红外隐身技术正受到各国军方的日益关注. 红外隐身技术主要是通过降低或改变目标的红外辐射特征来实现目标对红外系统的低可探测性, 具体措施包括改进热结构设计, 对主要发热部件进行强制冷却, 表面涂覆红外隐身涂料, 使用红外伪装网和遮障等. 与此同时, 对各种红外隐身技术的隐身效果评价方法研究也伴随着红外隐身技术的发展与应用成为军事红外技术中新的研究热点. 这一研究在各国军事领域中已经开展了约 30 年, 现有研究成果主要集中在利用红外成像系统对目标及背景进行探测, 形成红外热图像, 并通过人眼对目标进行发现或识别以得出主观结论的经验方法^[1]; 测定红外隐身材料热辐射特性的算术方法^[2,3]; 以及基于红外目标可探测性模型的计算机模型方法^[1,4,5]. 各种方法均有其优缺点, 但尚未有一种适合于军事工程应用, 能客观、准确、简便、快速地评价红外隐身效果.

本文提出了一种基于图像灰度相关算法的红外隐身效果评价方法, 通过对隐身前后目标图像的相关处理, 以相关峰的峰显著系数、峰-相关能量比和峰-背景比这三个量化指标衡量红外隐身装备所能达到的隐身效果. 实验结果证明这一方法具有良好的应用效果.

1 图像灰度相关算法原理

基于灰度的相关算法是根据一对图像灰度的点-点匹配, 或区域之间的匹配, 采用相关运算的方法来衡量两幅图像的相似性.

设 $f_L(x, y), f_R(x, y)$ 分别为左、右两幅图像的灰度函数, $\{A_i\} (i=1, \dots, p), \{A_j\} (j=1, \dots, q)$ 分别为左右图像上的点集. 则相关输出 C_{ij} 为

$$C_{ij} = \frac{\sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^q f_L(x_i+m, y_i+n) f_R(x_j, y_j)}{[\sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^q f_L^2(x_i+m, y_i+n) \sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^q f_R^2(x_j, y_j)]^{1/2}} \quad (1)$$

$(x_i, y_i) \in A_i \quad (i=1, \dots, p)$
 $(x_j, y_j) \in A_j \quad (j=1, \dots, q)$

则由 C_{ij} 构成的相关系数矩阵就是相关面.

2 基于相关峰特征分析的红外隐身效果评价

2.1 相关峰特征分析

由于图像灰度相关判别存在理论上的缺陷, 即一幅图像的灰度自相关峰值不一定大于它与另一幅图像的互相关峰值, 使得传统的仅对峰值取阈很容易造成误判, 因此采用对归一化相关函数提取相关峰特征参量来进行相似性判决, 进而得出对红外隐身效果的评价. 描述相关峰特性的参量有许多种, 结合图像处理实验, 采用以下三种特征参量作为相关峰特征的性能评价指标.

1) 峰显著系数 (Peak Notable Degree, 简称 PND), 定义为相关峰幅值与其邻域 ($n \times n$ 区域) 幅度均值之比, 即

$$PND = \frac{|peak|}{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |C_{ij}|} \quad (2)$$

式中, $peak$ 是相关峰的幅度.

实验表明: 相似程度越高的两幅图像的相关面其峰显著系数越大. 同时峰显著系数与邻域范围的选取密切相关, 邻域大小的选择要以能充分表达相关面上的主要信息为原则. 邻域范围以刚好能够完全覆盖相关峰为最佳, 理论上信息含量越大, 判决结果越准确. 当超过这一范围后, 相关面上的信息量急剧减少,

再增大探测范围,准确率也不会明显提高^[6].

2)峰-相关能量比(Peak to Correlation Energy ratio,简称 PCE),定义为

$$PCE = \frac{|peak|^2}{E_c} \quad (3)$$

式中 E_c 为相关面上的总能量,设相关面为 $N \times N$ 矩阵,则

$$E_c = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |C_{ij}|^2 \quad (4)$$

对于很尖锐的相关峰而言, $|peak|^2$ 将与 E_c 很接近, PCE 将变得很大;而对于较宽的相关峰来说, E_c 将比 $|peak|^2$ 大得多, PCE 将趋近于 0,因此 PCE 可用于衡量相关峰在整个相关面上体现出的尖锐度.

3)峰-背景比(Peak-to-Background Ratio,简称 PBR),定义为相关峰峰值幅度与相关面上除去相关峰之外的相关信号的平均幅值之比,即

$$PBR = \frac{|peak|}{\frac{1}{n^2-1} (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |C_{ij}| - |peak|)} \quad (5)$$

峰-背景比可用于反映相关峰在整个相关面上的显著程度.

2.2 红外隐身概率

根据图像灰度相关原理,采用红外隐身措施前后图像的相似程度应与三个相关峰特征参量的归一化值成正比,而红外隐身的目的在于降低目标被红外系统探测识别的概率,从最终红外系统的显示上看就是降低与采用红外隐身措施前图像的相似程度.依据这一原理提出了用于衡量红外隐身效果的客观评价指标——红外隐身概率.红外隐身概率定义为

$$S = 1 - (\eta_1 PND' + \eta_2 PCE' + \eta_3 PBR') \quad (6)$$

式中

$$\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 = 1 \quad (7)$$

式中, η_1 、 η_2 、 η_3 为三个相关峰特征参量的统计权重,在应用中根据人眼对红外图像的主观判读经验值予以确定, PND' 、 PCE' 、 PBR' 为三个相关峰特征参量除以自相关运算的相应值得到的归一化参量值.

3 实验结果

基于图像灰度相关算法的红外隐身效果评价实验流程如图 1,其中用到的图像预处理方法主要是采用 Laplace 算子对原始热图像进行锐化处理以加

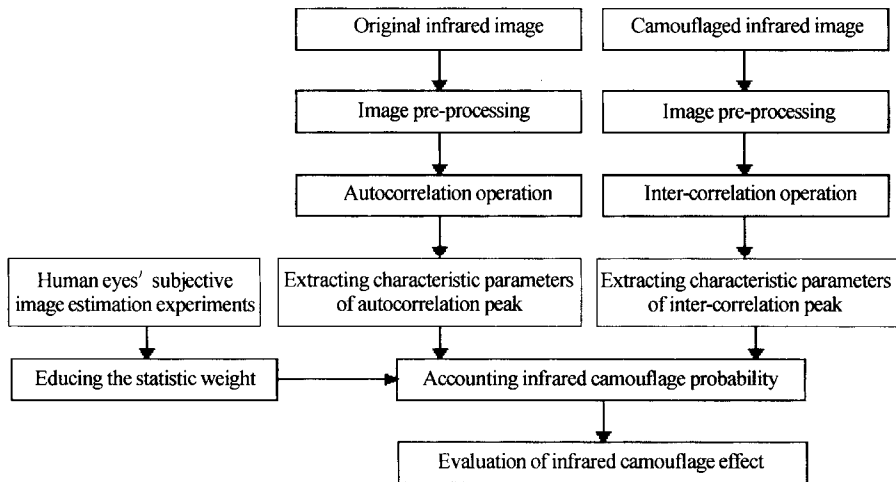


图 1 基于图像灰度相关算法的红外隐身效果评价流程

Fig.1 Flow chart of infrared camouflage effect evaluation based on image gray correlation algorithmic

强目标边界和图像细节,Laplace 算子定义为

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (8)$$

对于离散函数 $f(i, j)$, Laplace 算子的表达式为

$$\nabla^2 f(i, j) = f(i+1, j) + f(i-1, j) + f(i, j+1) + f(i, j-1) - 4f(i, j) \quad (9)$$

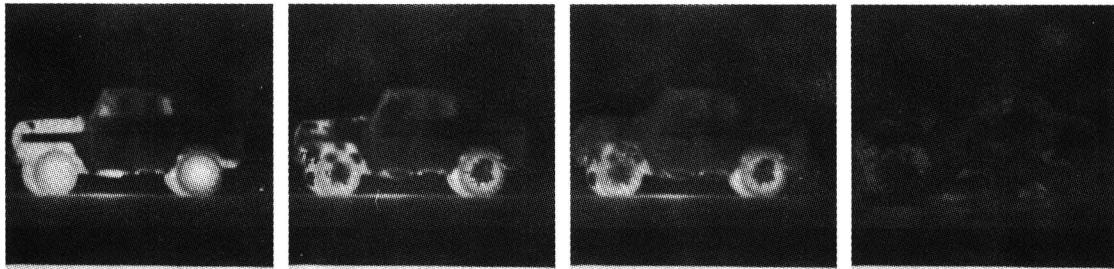
在实际矩阵运算中用 3×3 的掩模 h 表示

$$h = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

实验证明采用 Laplace 算子对图像进行锐化预处理

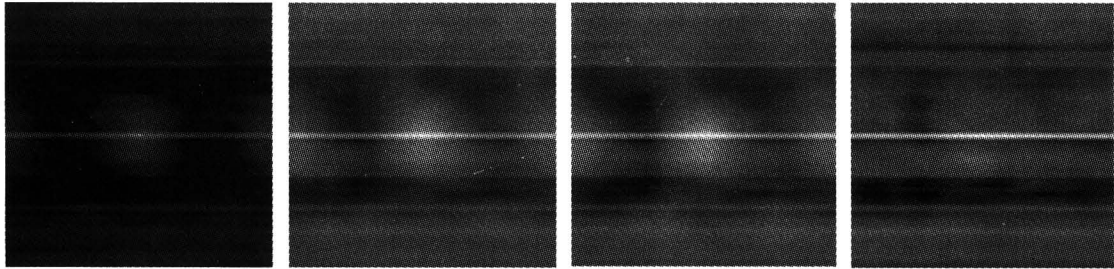
能在后续相关运算中使相关峰更加尖锐突出,从而更有利于相关峰的特征提取.

图 2(a) 为未采用红外隐身措施的目标热图, (b)、(c)、(d) 分别为采用不同红外隐身措施后的目标图像. 图 3(a) 为初始红外目标图像自相关面, (b)、(c)、(d) 分别为采用不同红外隐身措施后的目标图像与初始目标图像的互相关面. 图 4(a)、(b)、(c)、(d) 为与图 3 对应的相关面三维图. 表 1 为三种不同红外隐身效果的评价计算结果, 相关峰邻域取 50×50 , 三个特征参量的统计权重值分别为 $\eta_1 = 0.3$ 、 $\eta_2 = 0.5$ 、 $\eta_3 = 0.2$.



(a) Target thermal image without infrared camouflage measure (b),(c),(d) The thermal images applying different infrared camouflage measure

图 2 汽车的红外热图
Fig. 2 Infrared thermal images of car



(a) (b) (c) (d)

图 3 (a) 自相关面, (b)、(c)、(d) 互相关面
Fig. 3 (a) Self correlation surface, (b)、(c)、(d) Inter-correlation surface

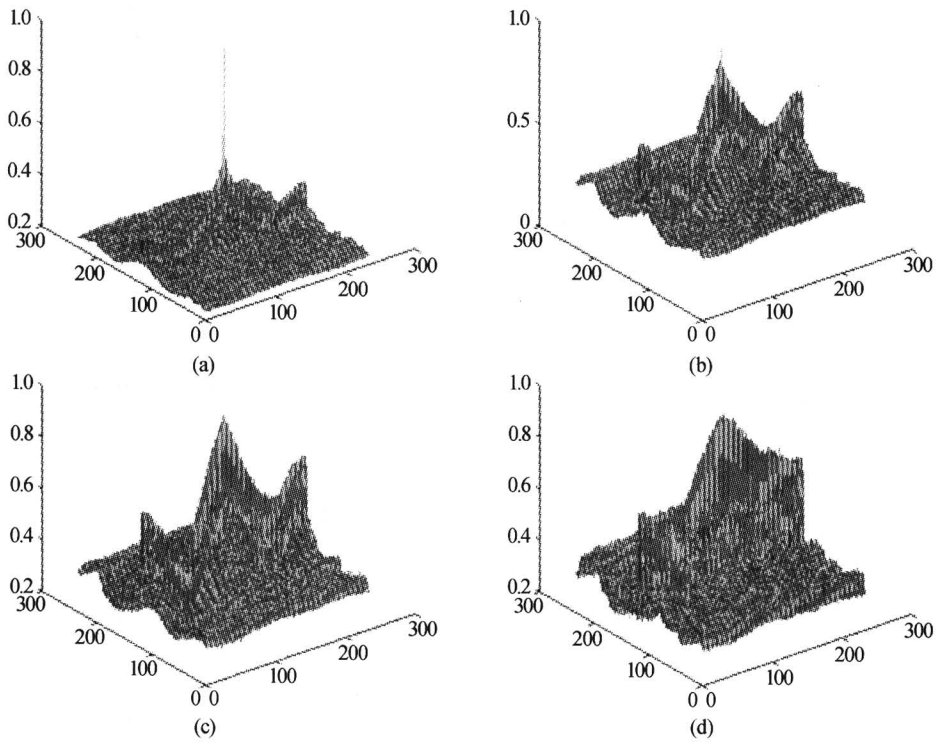


图 4 (a) 自相关峰, (b)、(c)、(d) 互相关峰
Fig. 4 (a) Self correlation peak, (b)、(c)、(d) Inter-correlation peak

表 1 红外隐身效果评价结果 (相关峰邻域为 50×50)

Figure	PND	PCE	PBR	PND'	PCE'	PBR'	S
1	3.5889	2.8624×10^{-4}	3.957	1	1	1	0
2	2.4947	1.5794×10^{-4}	2.9698	0.6951	0.5518	0.7505	36.6%
3	2.2741	1.2780×10^{-4}	2.6682	0.6336	0.4465	0.6743	45.2%
4	2.0096	1.0147×10^{-4}	2.5756	0.5600	0.3545	0.6509	52.5%

对大量红外图像的实验分析表明,这种基于图像灰度相关算法的红外隐身效果评价方法适用于对

地面典型军事目标的红外隐身效果进行客观评价,评价结果与依靠人眼进行主观判识的结论相符,一

般可认为红外隐身概率大于 60% 时达到了很好的隐身效果, 在相应探测距离上基本上无法发现目标, 而当这一数值低于 30% 时认为隐身效果较差, 达不到降低敌方红外探测概率的目的。

4 结论

本文提出了一种基于图像灰度相关算法的红外隐身效果客观评价方法。利用图像相关处理得到的三个相关峰特征参量来定义红外隐身概率作为衡量红外隐身效果的客观评价指标。所采用的相关峰三参量检测方法避免了单纯对相关峰取阈在判别图像相似性上容易出现的误判, 同时采用人眼对大量隐身前后红外目标图像的判读实验的统计结果来确定红外隐身概率中各参量的统计权重, 从而使计算机图像处理方法所得结果与实际应用中人眼通过红外系统观察目标的主观判识结果相一致。这种红外隐身效果评价方法既克服了以往依靠人眼判读主观经验方法的不足, 在技术难度和计算量方面又明显优于计算机模型方法, 经大量实验证明具有较强的实用性。

其中对相关峰三参量统计权重的确定还依赖于人眼的主观判识经验, 达不到完全的客观评价, 且与

人眼视觉特性有关, 原理复杂, 有待进一步研究。

参考文献

- 1 韩玉阁, 宣益民. 战车红外隐身效果评估方法研究. 红外技术, 2003, **25**(6): 22~24
Han Y G, Xuan Y M. *Infrared Technology*, 2003, **25**(6): 22~24
- 2 Patric V, Marc P. Global approach towards the evaluation of thermal infrared countermeasures. *SPIE*, 1991, **1486**: 58~64
- 3 Proesmans M, Verlinde P. Numerical evaluation of the efficiency of camouflage systems in the thermal infrared. *SPIE*, 1991, **1486**: 102~114
- 4 Grayson W W, James R Mc M. Characterization of natural background clutter for design of camouflage. *SPIE*, 1992, **1687**: 254~264
- 5 George S R, Reinhard B, Floris M G. Robust measure for camouflage effectiveness in the visual domain. *SPIE*, 2000, **4029**: 386~393
- 6 党东妮, 汪剑波. 一种提高光学模式识别准确性的后处理方法. 光电对抗与无源干扰, 2000, (3): 19~22
Dang D N, Wang J B. *Photoelectric Counterwork & Passive Disturbing*, 2000, (3): 19~22

Study on Infrared Camouflage Effect Evaluation Based on Gray Correlation

Huang Feng, Wang Yuefeng, Dong Wei, Hua Wenshen

Optics & Electrics Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003

Received date: 2005-09-15

Abstract An evaluation method based on image gray correlation algorithmic was put forward. The infrared camouflage probability was defined as an impersonal evaluation index to weigh the infrared camouflage effect through the correlation processing of the thermal images with or without camouflage measure and extracting characteristic parameters of correlation peak including peak notable degree, peak to correlation energy ratio and peak-to-background ratio. The statistic weights of different characteristic parameters were educed from the statistic results of human eyes distinguishing thermal images. So the computer image processing results can be consistent with the practical human eyes subjective distinguishing results. The experiment results show that the method is effective on evaluating the infrared camouflage effects of representative land military object.

Keywords Infrared camouflage; Evaluation method; Image gray correlation; Correlation peak



Huang Feng was born in 1979, in Fujian Province, China. He received his M. S. degree from Ordnance Engineering College of PLA in 2004. Now he is a lecturer working at Optics & Electron Engineering Department of Ordnance Engineering College of PLA. His major research fields are photoelectric countermeasure and infrared technology & application.