

文章编号: 1672-8785(2012)06-0032-06

基于相位谱的红外小目标搜索算法研究

许 强 马登武 郭小威

(海军航空工程学院兵器科学与技术系, 山东烟台 264001)

摘 要: 针对红外小目标搜索阶段中图像背景稀疏的特点, 提出了一种利用图像相位谱计算显著图和定位目标的新方法。与传统的利用海天线和海岸线对目标进行搜索的方法相比, 本文算法的计算复杂度大大降低, 并弥补了其受气温影响而不能准确定位海天线和海岸线的不足; 与利用 Itti 模型的方法相比, 该算法克服了其不能有效分离目标和背景的缺点。阐述了利用离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT) 和离散余弦变换 (Discrete Cosine Transform, DCT) 计算相位谱的两种方法及它们之间的一致性。构建了利用图像相位谱计算显著图的数学模型, 明确了模型参数选择的作用和意义。通过理论和实例证明了本文算法对于稀疏背景下小目标定位的可行性和高效性。

关键词: 稀疏背景; 红外小目标; 搜索; 相位谱; 显著图

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.06.007

Search Algorithm for Small Infrared Targets Based on Phase Spectrum

XU Qiang, MA Deng-wu, Guo Xiao-wei

(Department of Ordnance Science and Technology, Naval Aeronautical and Astronautical
University, Yantai 264001, China)

Abstract: According to the fact that the background of a small infrared target is sparse in the searching stage, a novel target locating method which uses a salient map based on the phase spectrum in an image is proposed. Compared with the traditional target search method based on sea-sky-line or coastline, this method has reduced its computational complexity greatly and overcome the shortage that the sea-sky-line or coastline can not be located accurately due to the unstable temperature. Compared with the method using an Itti model, the algorithm has overcome the weakness that the target can not be separated from the background. Two methods which use Discrete Fourier Transform (DFT) and Discrete Cosine Transform (DCT) to calculate the image phase spectrum are presented and their consistency is proved. A mathematic model which uses phase spectrum to calculate saliency map is established. Parameter selection of the model is explained. The theory and examples show that this algorithm is feasible and efficient.

Key words: sparse background; small infrared target; search; phase spectrum; saliency map

0 引言

稀疏背景是指具有相对简单的纹理特征,

且谱特征具有较少支撑点的图像。远距离观察下的近岸和海上场景都可以归为这种背景。稀疏背景是当前红外成像制导武器运用的一个主要

收稿日期: 2012-05-04

作者简介: 许强 (1975-), 男, 河南驻马店人, 博士生, 主要研究方向为红外图像目标自动识别。

E-mail: xuqiang050@sina.com

场景, 其研究具有重要的现实意义。红外成像导引头对目标的辨识过程依次可以分为搜索、跟踪和识别三个阶段。其中, 在搜索阶段, 目标较小, 加之受各种背景噪声的影响, 对目标的定位存在很大困难。文献 [1,2] 等利用海天线和海岸线对目标进行了搜索。这种方法受气温条件影响大, 容易造成虚警, 而且在计算海天线及海岸线方位和进行目标分割时复杂度较高, 不适合对时限要求很高的搜索阶段。视觉心理学研究表明, 人类在看一个场景时, 往往会在很短的时间内找到几个显著区, 然后再细看显著区域里的内容 [3]。视觉注意机制就是通过模拟人类视觉的这个原理, 利用图像的显著图对大场景内的目标进行初步定位的。当前人们对视觉注意机制的研究主要还是围绕 Itti 模型 [4] 展开的。相对于常用的目标搜索方法, 这一模型在计算复杂度方面有所降低。作为一种对场景进行整体处理的方法, Itti 模型无需对场景进行分割和关键点匹配等局部处理。但对于稀疏背景下的红外小目标搜索, 这种方法在复杂度计算和背景分离方面的能力还显不足。在图像的 Fourier 表达式中, 幅度谱和相位谱分别代表不同的意义。相位谱包含了图像各频率成分的相互位置信息, 而幅度谱则包含了各频率成分的功率信息。其中, 相位谱对图像分析起着非常重要的作用 [5]。文献 [6] 利用压缩感知原理, 从理论上证明了在稀疏背景条件下, 利用相位谱可以把目标标注为显著区域。由于相位谱的计算非常简单, 利用基于相位谱的视觉注意机制能够快速、准确地发现稀疏背景下的红外小目标。

1 视觉注意机制

视觉注意机制是人类初级视觉的主要功能。当面对一个复杂场景时, 人们总会首先确定需要重点处理的几个区域, 这些区域被称为显著性区域。视觉注意使人类视觉系统能够以不同的次序和力度对各个场景区域进行选择性地处理, 因而可以避免计算浪费, 降低分析难度 [7]。根据视觉注意机制, 人们建立了很多计算模型

。其中最重要的是由 Koch C 等人 [8] 提出的用于模拟生物体的视觉注意机制的模型。Itti L 等人 [4] 完善了这一模型。他们从视觉分析的角度出发, 用通过模拟人类视觉系统构建的视觉注意模型获得了与人类视觉系统比较接近的显著区域。此后的视觉注意机制计算模型大多是围绕 Itti 模型展开的。Itti 模型使用图像金字塔分解亮度、颜色和方向等多尺度特征, 从而形成单个特征显著图。然后将这些显著图合并, 生成总的注意区域。图 1 所示为 Itti 模型的显著图计算流程图。Itti 计算模型对于具有较多纹理信息的彩色图像较为有效, 但稀疏红外场景是灰度图像, 其纹理特征比较模糊。如果用 Itti 模型进行计算, 不但很多特征计算不起作用, 而且容易造成目标与背景混叠。而利用场景的相位谱计算显著图, 其计算复杂度低, 而且还能实现目标与背景的有效分离。后面我们将用实例加以说明。

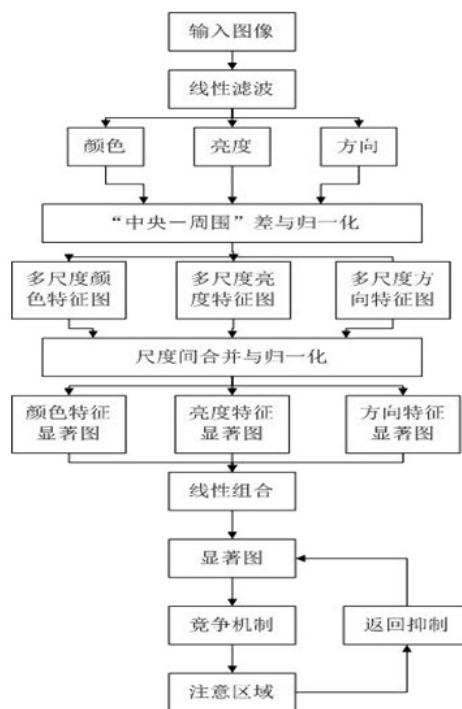


图 1 显著图的计算框架

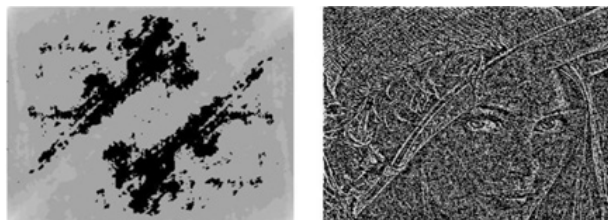
2 基于相位谱的显著图模型

在图像的 Fourier 频域中, 一般可以认为幅度谱包含图像的明暗对比信息, 相位谱包含图像的纹理结构信息。与图像的幅度谱相比, 相位

谱中保存有图像更重要的特征。图 2(a) 为只用幅度信息恢复的 Lena 图像, 图 2(b) 为只用相位信息恢复的 Lena 图像。从图 2 中可以看出, 幅度恢复图与原始图像相差极大, 图像的细节结构没有保存下来, 丢失了原有图像的几乎全部结构特征; 而相位恢复图丢失了原有的亮度对比信息, 却包含了原始图像的绝大部分细节结构。

2.1 两种相位谱计算方法的比较

针对数字图像的相位谱有各种计算方法。其中比较常用和容易计算的有两种: 一种是 DFT 中的相位谱; 另一种是 DCT 中的相位谱。为了清晰描述这两种相位谱的等价性, 下面我们参考文献 [9] 用一维序列进行说明。



(a) 幅度恢复图

(b) 相位恢复图

图 2 Lena 图像

设 $g(n)$ 是一个 N 点的一维序列, $G_c(k)$ 是其 DCT 变换。若 $G_c(k)$ 是一个实函数, 则可用其绝对值 $|G_c(k)|$ 和 DCT 符号函数 $G'_c(k) = \text{sign}(G_c(k))$ 表示:

$$G_c(k) = |G_c(k)|G'_c(k) \quad (1)$$

设 $G(k)$ 是 $g(n)$ 的 DFT 变换。若 $G(k)$ 是一个复函数, 则可用其幅度值 $|G(k)|$ 和相位值 $G'(k)$ 表示:

$$G(k) = |G(k)|G'(k) \quad (2)$$

设 $\hat{g}(n)$ 是 N 点序列 $g(n)$ 的 $2N$ 点对称扩展, 其定义为

$$\hat{g}(n) = \begin{cases} g(n), & n = 0, 1, \dots, N-1 \\ g(2N-n-1), & n = N, N+1, \dots, 2N-1 \end{cases} \quad (3)$$

$\hat{g}(n)$ 的 $2N$ 点 DFT 变换 $\hat{G}(k)$ 可以表示为

$$\hat{G}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} g(n)(W_{2N}^{nk} + W_{2N}^{-(n+1)k}) \quad (4)$$

式中, $W_N = \exp(-j2\pi/N)$ 。那么, 序列 $g(n)$ 的 DCT 变换相谱 $G'(k)$ 与序列 $\hat{g}(n)$ 的 DFT 变换相谱 $\hat{G}'(k)$ 之间可以表示为以下关系式:

$$G'_c(k) = W_{2N}^{k/2}\hat{G}'(k), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

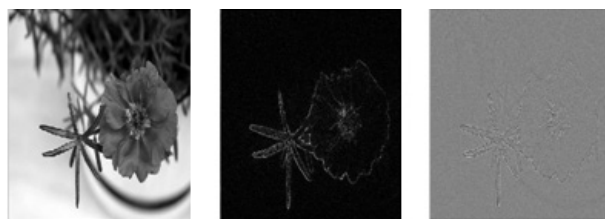
由式 (5) 可以看出, 利用数字图像序列的 DFT 和 DCT 求得的相位谱是等价的。但由于用 DCT 求得的相谱是由 ± 1 和 0 组成的, 它相对于 DFT 求得的相谱更易于计算和更具鲁棒性。图 3 为分别用 DCT 和 DFT 相位谱恢复的图像。

2.2 利用相谱计算图像显著图的理论依据

文献 [6] 用压缩感知原理^[10] 证明了在稀疏背景条件下用 DCT 的相谱计算图像显著图的可行性。下面对这个理论依据给以简要的说明。假设有一个结构如下的灰度图像:

$$x = f + b, \quad x, f, b \in R^N \quad (6)$$

式中, f 为前景图像, 也可以说是目标图像。它被假定在空间基下是稀疏的, 也可以说目标图像相对于整个背景图像所占的像素数较少。 b 为背景。它在 DCT 域中是稀疏的, 也可以说在 DCT 域中的非零系数较少。这种类型的图像就适合用相位谱来计算显著图, 其理论依据基于以下两个命题。



(a) 原图

(b) DFT 恢复图

(c) DCT 恢复图

图 3 恢复图像对比

2.2.1 命题 1

如果图像的前景在空间域足够稀疏, 背景在 DCT 变换域也足够稀疏, 那么由图像的 DCT 相位谱可以估计图像前景的位置, 即

$$E\left(\frac{\langle \bar{f}, \bar{x} \rangle}{\|\bar{f}\| \cdot \|\bar{x}\|}\right) \geq 0.5, \quad \text{for } |\Omega_b| < \frac{N}{6} \quad (7)$$

式中, $E(X)$ 为随机变量 X 的期望值; $\bar{f} = \text{IDCT}(\text{sign}(\text{DCT}(f)))$; $\bar{x} = \text{IDCT}(\text{sign}(\text{DCT}(x)))$; Ω_b 为背景图像 DCT

域的基数, 也就是 1 范数。

2.2.2 命题 2

对于由独立同高斯分布点组成的前景图像 f , 其 DCT 相位谱反变换 $\bar{f}$ 的 79 % 能量属于前景图像, 即

$$E\left(\frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}\right) \geq \sqrt{\frac{2}{\pi}} \approx 0.7979 \quad (8)$$

式中, $\alpha = \sqrt{\sum_{i \in T_f} \bar{f}_i^2}$; $\beta = \sqrt{\sum_{i \notin T_f} \bar{f}_i^2}$; T_f 为前景图像非零点的集合。

从以上两个命题中可以看出, 在图像稀疏(前景在空间域, 背景在 DCT 变换域)的情况下, 通过图像 DCT 相位谱反变换恢复的图像中, 恢复的前景部分不仅占了整个恢复图像中的大部分, 而且还恢复了前景中的大部分。因此, 利用图像的 DCT 相位谱的反变换可以有效地得到图像的显著图。

2.3 基于相位谱的显著图计算模型

与 Itti 模型(见图 1)相比, 基于相位谱的显著图计算模型非常简单, 其基于式(9):

$$m = g * (\bar{x})^k \quad (9)$$

式中, m 为显著图; g 为高斯滤波算子; k 为大于等于 2 的整数; $*$ 为卷积; $\bar{x}$ 为图像 x 相位谱的反变换。如 2.1 节所述, 主要有两种实现方法: 一种是 DFT 变换, $\bar{x} = IDET(\exp(i \cdot \text{angle}(DFT(x))))$; 另一种是 DCT 变换。根据模型参数的选择过程, 我们把模型的计算分为三个步骤:

(1) 为了使输入图像满足稀疏性要求, 需要对输入的图像进行适当变换, 缩小其尺寸, 消除图像的纹理细节。在求得图像的显著图之后, 为了将其与输入图像进行对比, 可以使显著图恢复至输入图像尺寸。

(2) 参数 k 的选择。这里的 k 次方是指 $\bar{x}$ 以 Hadamard 积相乘。当图像的灰度在 $[0, 1]$ 区间内变化时, 参数 k 的作用是使图像的显著点的突显程度拉开距离。随着 k 的增大, 显著度高的点更显著, 而显著度低的点逐渐消失, 最后可以筛选出显著度最高的点。

(3) Guass 卷积模板大小和标准差 δ 的选择。

这两个参数决定了显著图中的显著区域显示的形状。

在下一节中, 我们将用数据验证这些参数选择的作用。

3 实验结果分析

我们首先基于检测海空背景下红外小目标这一前提, 比较本文算法和一种相对准确的基于海天线的算法。图 4(a) 为一幅海天背景下分辨率为 120×100 像素的小目标红外图像。文献 [2] 针对海面小目标处于海空线这一先验知识, 利用基于小波变换和多方向 Gabor 滤波融合的方法检测海天线, 并利用运动目标的相关性检测小目标。图 4(d) 为这一算法的检测结果。从图 4(d) 中可以看出, 这种算法能够准确检测出小目标。但从对这种算法的介绍中可以看出, 此算法需要经过两次较复杂的滤波过程才能确定海天线, 然后还要利用相关性检测潜在区域。其计算量大, 复杂度高。运用本文的相位谱计算显著图方法, 也能够准确检测出小目标(图 4(b) 和图 4(c) 分别为图像的显著图和相应的目标标定), 但其计算复杂度大大降低了。在这幅图像的计算中使用了以下参数: 分辨率缩小为 60×50 像素; $k = 4$; Guass 模板的大小为 5×5 , $\delta = 2.5$ 。

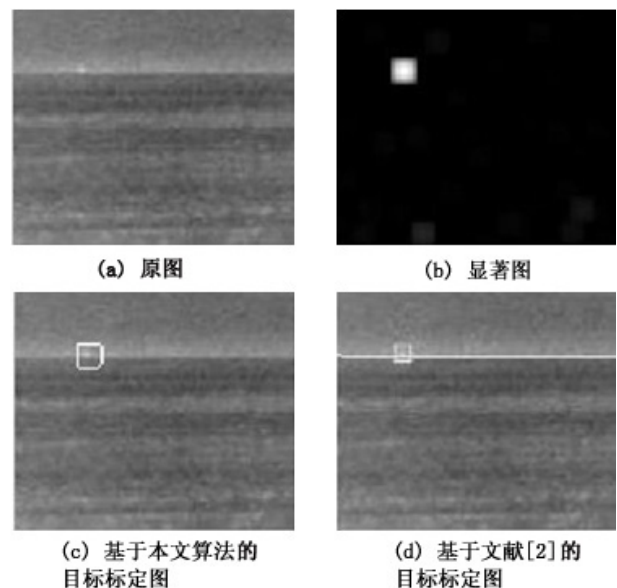


图 4 实验一的结果对比

在第二个实验中, 我们比较基于相位谱和 Itti 模型计算显著图的方法。图 5(a) 为一幅分辨率为 240×180 像素的近岸背景红外图像。图 5(b) 和图 5(c) 分别为用相位谱方法计算的图像显著图和相应的目标标定。在这幅图像的计算中使用了以下参数: 分辨率缩小为 60×45 像素; $k = 4$; Gauss 模板的大小为 5×5 , $\delta = 2.5$ 。图 5(d) 为用 Itti 模型显著图标定的目标。从图 5(d) 中可以看出, Itti 模型对这种背景较复杂的目标不能准确标定, 而且计算复杂度高 (见图 1)。

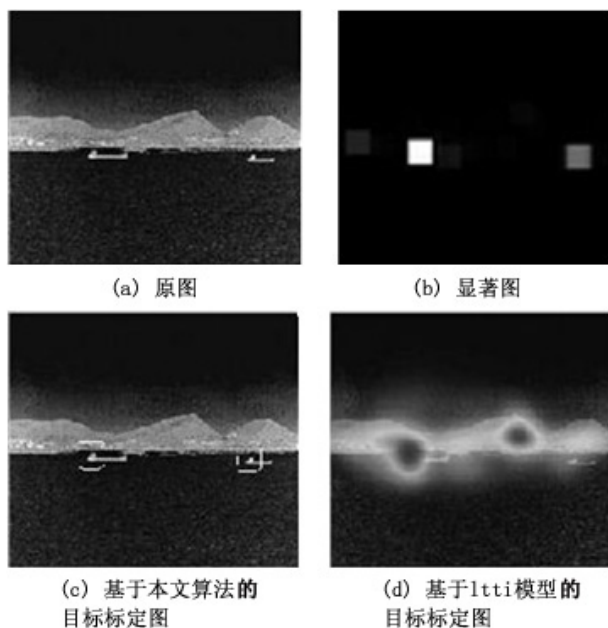


图 5 实验二的结果对比

第三个实验验证了本文算法中的参数选择对目标标定的影响。图 6 所示为验证 Gauss 模板标准差的影响情况。其中所用的原始图像是实验一中的图 4(a)。除了 Gauss 模板标准差之外, 其他参数与实验一相同。图 6(a) 和图 6(b) 所示为用 $\delta = 2.5$ 计算的显著图和目标标定; 图 6(c) 和图 6(d) 所示为用 $\delta = 1$ 计算的显著图和目标标定。从图 6 中可以看出, δ 的大小对标定目标的集中度是起作用的。当 δ 逐渐增大时, 显著点斑由圆点变成 Gauss 模板形状。图 7 为参数 k 的影响示意图。其中所用的原始图像是实验一中的图 4(a)。除了参数 k 之外, 其他参数与实验一相同。图 7(a) 和图 7(b) 所示为用 $k = 2$ 计算的

显著图和目标标定; 图 7(c) 和图 7(d) 所示为用 $k = 4$ 计算的显著图和目标标定。从图 7 中可以看出, k 的大小对突出目标显著度有作用。当 k 太小时, 不能准确突出所搜索的目标。

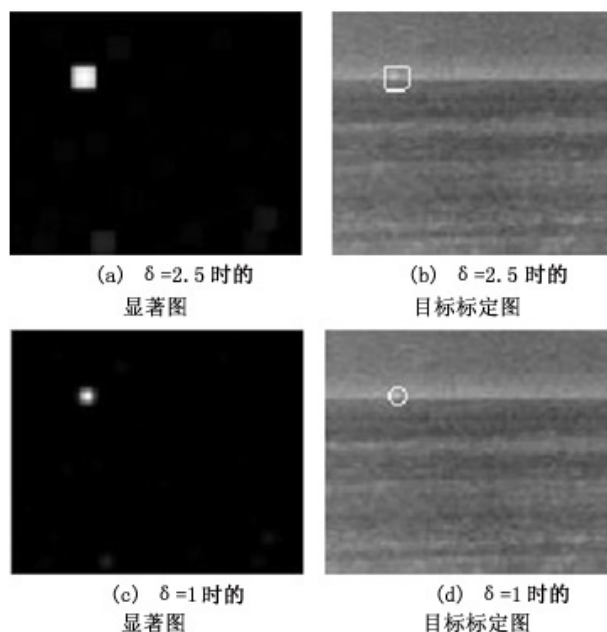


图 6 δ 的影响情况

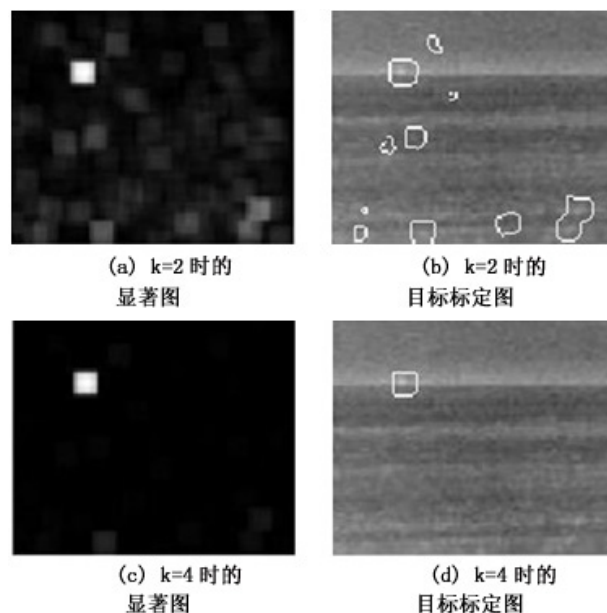
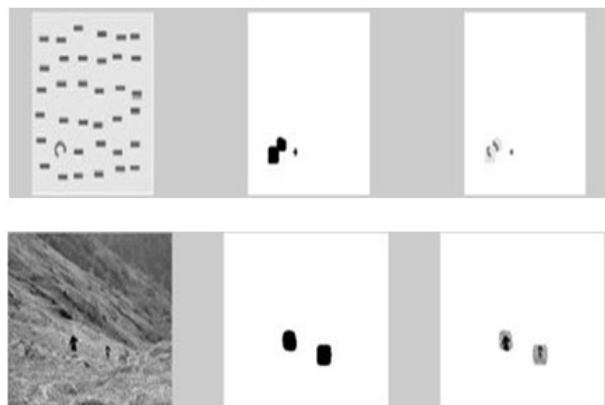


图 7 k 的影响情况

在第四个实验中, 我们用一张纹理图和山地背景图说明本文算法的有效性, 同时也说明本文算法之所以有效, 是因为它把待搜索的小

目标看作稀疏大背景下纹理变化显著的区域。图8(a)、图8(b)和图8(c)分别为原图、显著图和目标标定图。



(a) 原图 (b) 显著图 (c) 目标标定图

图8 实验四的结果对比

4 总结和展望

对于稀疏背景下的红外小目标搜索算法的研究具有重要的现实意义。从本文的理论推导和实验例证中可以看出, 基于相位谱的视觉注意机制对于定位稀疏背景下红外小目标具有可行性和有效性。当然, 从本文的最后一个例子中也可以看出, 这种算法对于稀疏背景下可见光和SAR图像小目标的搜索同样有效。本文所建模型的参数设定需要作进一步研究和探讨。利用特定场景的训练集对参数值进行学习是可以进一步开展的工作。本文所建模型只通过简单利用相位谱信息便取得了较好的效果。通过对相位谱

信息作进一步统计学习和建模分析, 这些工作将会对红外小目标识别起到更加精准的作用。

参考文献

- [1] 魏颖, 史泽林, 李成军, 等. 海空背景下红外小目标检测算法 [J]. *红外与激光工程*, 2003, **32**(2): 153-156.
- [2] 吴建东, 毛海岑, 张天序. 基于知识的旋转海面小目标检测 [J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(2): 222-225.
- [3] Tsotsos J K, Culhane S M, Lai Y H, et al. Modelling Visual Attention via Selective Tuning [J]. *Artificial Intelligence*, 1995, **78**(1): 507-545.
- [4] Itti L, Koch C, Niebur E. A Model of Saliency-based Visual Attention for Rapid Scene Analysis [J]. *IEEE Transactions on PAMJ*, 1998, **20**(11): 1254-1259.
- [5] Ian V O, Jae S L. The Importance of Phase in Signals [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1981, **69**(5): 529-541.
- [6] Hou X D, Jonathan H, Christof K. Image Signature: Highlighting Sparse Salient Regions [J]. *IEEE Trans Pattern Anal*, 2012, **34**(1): 194-201.
- [7] 任仙怡, 张基宏, 梁永生. 视觉注意机制在大视场目标快速定位中的应用 [J]. *计算机工程与应用*, 2010, **46**(27): 153-155.
- [8] Koch C, Ullman S. Shifts in Selective Visual Attention: towards the Underlying Neural Circuitry [J]. *Human Neurobiology*, 1985, **4**(4): 219-227.
- [9] Izumi Ito, Hitoshi Kiya. Modified Phase Only Correlation Using the Signof DCT Coefficients with Application to Image Matching [C]. Hawaii: ICASSP, 2007: 1144-1148.
- [10] Candes E, Tao T. Near-Optimal Signal Recovery from Random Projections: Universal Encoding Strategies [J]. *IEEE Trans Information Theory*, 2006, **52**(12): 5406-5425.

新闻动态 News

美国 Northrop Grumman 公司开始大批量生产红外导弹预警系统

据 www.spacewar.com 网站报道, 美国空军最近已经批准 Northrop Grumman 公司大批量生产用于 C-17、EC-130J、HC/MC-130J 以及其他空军平台的下一代红外导弹预警系统。

Northrop Grumman 公司红外对抗项目的负责人表示, 这次具有里程碑意义的决策将会使美国空军拥有最先进的导弹预警系统(探测距离更远且虚警率更小)。

目前, Northrop Grumman 公司的红外对抗系统已经被安装或者计划被安装在几百架军用飞机上, 以保护大约 50 种不同类型的大型固定翼运输机和旋转翼飞机免受红外导弹攻击。

□ 岳桢干