第 36 卷 第 10 期
2016 年 10 月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 36, No. 10
October, 2016

基于最佳响应阈值的背景杂波度量

郑 博[1,2] 王 健[1] 周鹏骥[1] 王晓东[1] 孙 强[1] 许文斌[1]

[1]中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033

[2]中国科学院大学，北京 100049

摘要 以往的背景杂波度量存在取固定经验性的权重值或忽略人眼视觉响应(HVS)等问题，无法准确度量背景杂波。提出一种新的杂波度量方法，这种方法引入最佳响应阈值模拟人眼对杂波响应的适应性，并利用该阈值研究背景的相似性对目标获取性能的影响，进而完成对杂波的度量。利用 Search_2 数据库验证该杂波度量方法的合理性。实验结果表明，基于该度量的目标获取性能预测与主观数据一致。目标探测概率的均方根误差为0.0835，相关系数分别为 0.7124 和 0.7444；目标虚警概率的均方根误差为 0.0691，相关系数分别为 0.7874 和 0.6753；目标搜索时间的均方根误差为 3.2321，相关系数分别为 0.7630 和 0.7710。

关键词 成像系统；背景杂波度量；目标获取性能；人眼适应性；杂波响应

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A

doi：10.3788/AOS201636.1011004

Background Clutter Metric Based on Optimal Response Threshold

Zheng Bo[1,2] Wang Jian[1] Zhou Pengji[1] Wang Xiaodong[1] Sun Qiang[1] Xu Wenbin[1]

[1] *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*

[2] *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract As the previous clutter metrics have such problems as extracting the weight value from the fixed experience and taking no consideration of the human visual response, they cannot measure the background clutter accurately. We propose a new clutter metric, in which the optimal response threshold is introduced to simulate the adaptability of the human eye to the clutter response. The optimal response threshold is also used to evaluate the effect of the background similarity on the target acquisition performance so as to measure the clutter. The proposed metric is tested by the Search_2 database. The testing results demonstrate that the target acquisition performance prediction based on the clutter metric is in accordance with the subjective data. The mean square error of the target detection probability is 0.0835, and the correlation coefficients are 0.7124 and 0.7444; the square mean error of the target false alarm rate is 0.0691, and the correlation coefficients are 0.7874 and 0.6753; the square mean error of the target search time is 3.2321, and the correlation coefficients are 0.7630 and 0.7710.

Key words imaging systems; background clutter metric; target acquisition performance; adaptability of human eye; clutter response

OCIS codes 110.3000; 040.1240; 040.1880; 110.2990

1 引 言

随着对光电成像系统性能要求的提高，场景中与目标相似的物体逐渐成为影响成像系统性能的重要因素。这些物体不但浪费观测者的观察时间，而且会混淆观测者的判断。因此，背景杂波的量化以及建立背景杂波与目标获取性能间的定量关系成为当今光电成像系统性能评价的重要课题[1-2]。

收稿日期：2016-04-22；**收到修改稿日期**：2016-05-31

基金项目：吉林省重点科技攻关项目(20140204030GX，20140204058GX)

作者简介：郑 博(1988—)，男，博士研究生，主要从事图像处理、红外成像系统性能评价方面的研究。E-mail：2629164931@qq.com

导师简介：王晓东(1965—)，男，博士，研究员，主要从事红外成像系统性能评价、光电探测与检测及信息处理方面的研究。E-mail：Wangxd@ciomp.ac.cn(通信联系人)

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

目前，背景杂波度量的方法主要包括基于数学定义的杂波度量和基于人眼视觉特性的杂波度量。统计方差杂波度量(SV)及其改进的杂波度量[3]属于基于数学定义的杂波度量方法，这两种方法计算简单、适用于大多数自然场景，但无法准确描述复杂的背景特征。边缘概率杂波度量(POE)[4]、边缘强度杂波度量(ES)和图像熵杂波度量[5]都属于基于人眼视觉特性(表现为人眼对图像中高对比度的扩展区域和明显的边缘轮廓较为敏感[6])的杂波度量方法，它们通过统计背景中边缘点数目、强度，计算背景的信息量来度量杂波，但这些方法忽略了杂波的本质，抛开目标，仅计算人眼对背景中非目标区域的敏感程度，导致度量结果不准确。基于梯度分布特征的杂波度量(ESSIM)[7]将梯度分布作为一种结构特征并度量目标和背景在该特征上的相似性；目标结构相似度杂波度量(TSSIM)[8]在模型中加入了人眼视觉的亮度掩盖效应和对比度效应，通过计算背景与目标的亮度、对比度和结构的相似度度量杂波；基于隐马尔科夫模型的杂波度量(HMMC)[9]通过模拟人眼的适应性寻找目标的最优表征参数，并据此计算背景区域与目标的相似性；基于稀疏表示的杂波度量(SRC)[10]在特征空间寻找目标对背景的最稀疏表示，并以相似向量中的非零项计算杂波。这4种方法都较好地弥补了上述方法中忽略目标与背景相似性的不足，分别利用不同的方法提取了背景和目标的图像特征，从而度量它们的相似程度，其本质是把杂波度量看作人眼对相似图像信息的搜索和感知过程[11-12]，但这些方法均未考虑人眼对杂波的响应。基于人眼对比度敏感函数的杂波度量($CSFC_{MS}$)[13]，利用Mannos-Sakrison函数[14]，根据人眼在空间频率域的认知度对杂波的相似性进行加权；基于观察者认知的杂波度量(BSD)[15]把杂波看作人眼感知和大脑认知的综合效应，并基于大脑认知模型对结构相似的图进行加权。这两种方法在度量目标和背景相似性的同时考虑了人眼对杂波的响应，与之前方法相比，更为准确地度量了背景杂波。

本文将杂波度量看作人眼在背景中搜索相似区域并对这些区域作出适应性响应的过程，并据此提出一种新的背景杂波度量方法，即基于最佳响应阈值(ORT)的杂波度量。这种方法基于人眼对结构边缘敏感的视觉特性[16]，以边缘点的强度信息和方向信息为特征获取背景的相似性；建立基于二维响应阈值的预测数据和主观数据的均方根误差(RMSE)曲面；寻找曲面的最低点作为人眼对杂波响应的最佳阈值(由于该阈值的选取与所观测的目标和背景相关且对应预测数据的最佳点，可模拟人眼对杂波响应的适应性[17])；基于最佳响应阈值判断背景相似性对目标获取性能的影响进而完成对背景杂波的度量。实验结果表明，基于该准则的性能预测结果与外场主观测试数据符合度较高，有效提高了复杂场景下目标获取性能模型的预测精度。

2　基于最佳响应阈值的背景杂波度量

基于人眼对结构边缘信息敏感的特性，杨翠等[18]于2012年提出结构边缘杂波度量方法(DOE)，这种方法可以较为准确地度量背景对目标获取性能的影响；同年，Toet在文献[19]中指出目标和背景的结构相似性决定观察者的视觉搜索性能，而亮度和对比度信息对探测过程没有影响。选择性视觉注意理论已广泛应用于图像分割、目标探测和识别，这些方法可以模拟人眼的适应性，有效提高图像处理效果[20]。因此，提出的杂波度量方法忽略亮度和对比度信息，把边缘点的强度和方向信息作为衡量背景相似性的特征。基于选择性视觉注意理论中的人眼阈值模型[21-22]，提出一种假设：人眼对强度信息和方向性信息的响应具有阈值性，只有背景区域的相似性高于阈值时人眼才会感知并错误地将其当作目标，最终影响目标获取性能。此杂波度量方法的主要过程如下。

1) 背景图像和目标图像从灰度空间转换至亮度空间，将背景图像划分为 N 个区域，各单元水平方向和垂直方向的尺寸均为目标图像尺寸的两倍。

2) 分别用垂直和水平Sobel算子对图像区域进行滤波，得到两幅图像。一幅图像用来存储边缘点强度信息，另一幅图像用来存储边缘点方向信息。定义边缘点强度阈值为 T，在强度图像中统计强度值高于平均值 T 倍的边缘点，其数量记为 N。

3) 在方向图像中找到上述 N 个点中对应的边缘点，统计它们在 $0°\sim180°$ 范围内6个等间距角空间中的个数，组成向量 $\boldsymbol{N}_k$，定义边缘点的特征向量为

$$\boldsymbol{d} = \boldsymbol{N}_k / N, \tag{1}$$

式中 $k=1,2,3,\cdots,6$。边缘点的特征向量包括边缘点的强度信息和方向信息。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4）对目标图像和背景块作同样的运算，获取边缘点的特征向量，目标图像和背景块的相似性定义为[18]

$$C_r = \frac{N_r + B_r}{2} \| \boldsymbol{d}_r - \boldsymbol{d}_t \|_2 , \tag{2}$$

式中 N_r 为第 r 个背景块中超过强度阈值 T 的边缘点的数量，B_r 表示第 r 个背景块中边缘点的数量，$\boldsymbol{d}_r$ 和 $\boldsymbol{d}_t$ 分别为第 r 个背景块和目标图像的边缘点特征向量。

5）定义方向相似阈值为 C，从相似性图中选取被错误当作目标的区域（当该区域的 C_r 值低于 C 时，认为这个区域被人眼错误地当作目标），将该区域的相似性计入全局的背景杂波值中。整幅图像的杂波度量值为

$$O = \sum_{r=1}^{M_{\text{below}}} C_r / M_{\text{below}} , \tag{3}$$

式中 M_{below} 为 C_r 值低于阈值的背景块的个数。至此，在背景杂波度量中有两个阈值变量 C 和 T，C 和 T 不同的取值将得到不同的杂波值。

3　最佳响应阈值的确定

当观察者在复杂的背景中搜索目标时，与目标相似的区域会影响观察者的判断。如果某一区域与目标的相似度很高，观察者难以分辨，影响探测性能；与目标的相似度较低的区域，人眼容易识别，不会影响探测性能。仅通过度量背景与目标的相似程度而不考虑人眼对杂波的响应，与选择性注意过程不符[23]。

以往的杂波度量使用权重表征人眼对杂波的响应，计算过程中选取固定的经验值作为权重值，由于经验值与具体观测者的视觉感知能力相关且未考虑所观察图像的特征，无法普遍应用于背景的度量。因此，提出了一种确定人眼响应阈值的方法，该方法利用二维响应阈值平面建立预测数据和主观数据的均方根误差曲面，该曲面最低点对应的阈值即为最佳阈值。最佳阈值点的获取与所要评价的背景和目标相关，并对应均方根误差曲面的最低点，故能模拟人眼杂波响应的适应性。

2000 年，美国空军 Wilson[24] 提出一种基于图像的背景杂波值预测目标探测概率的模型，此目标获取性能预测模型为

$$P_{\text{pred}} = \frac{(X/X_{50})^E}{1 + (X/X_{50})^E} , \tag{4}$$

式中 P_{pred} 为探测概率预测值，X 为杂波度量值，X_{50} 和 E 为最小二乘拟合的优化参数。

建立二维阈值平面，其 x 轴和 y 轴分别表示 C 和 T。如图 1 所示，平面中每一个点的横纵坐标为一对阈值，整个平面代表 C 和 T 的所有取值情况。将平面上一对阈值代入上述的杂波度量中得到一个杂波值，将该杂波值代入(4)式，得到预测目标探测概率，并计算杂波值与主观数据的均方根误差，此均方根误差与之前的阈值点相对应。利用同样的方法，计算阈值平面上每一个阈值点对应的均方根误差，所有的均方根误差值将组成一个曲面，该曲面即为二维阈值空间的均方根误差曲面。

图 2、3 为均方根误差曲面及其等高线。坐标 T 和 C 分别为边缘点强度阈值和方向相似性阈值，它们代表人眼在相似性判断过程中对强度和方向相似性的响应。图中有 4 个极小值，其中一个极小值在 $C=0$ 处，表明人眼对边缘点的零强度产生响应，这显然与事实不符；其余 3 个极值都在 $C=0.21$ 附近，表明当边缘点的方向相似性超过 21%时，人眼无法区分目标和背景。在这些极小值中，$T=0.61$处的值为最小值，表明当边缘点强度超过平均强度的 61%时，人眼才会察觉到边缘点。综合以上分析，最佳阈值为 $C=0.21$，$T=0.61$，且基于这一对阈值的目标探测概率预测与主观数据的均方根误差最小。

4　实验结果

借助 Search_2 图像数据库[25-26]验证提出的杂波度量方法的合理性。Search_2 图像数据库由荷兰应用科技研究组织人类因素研究所提供，其中包含 44 幅不同场景的数字彩色图像，每幅图像中含有 1～2 个目标，其中的主观数据由外场观测实验获得。64 名专业观察者参与实验过程，对每幅图像进行观测并搜索目标，获得在该背景下的主观探测数据。图 4 为数据库中的第 8 幅图像及其对应的目标图像。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

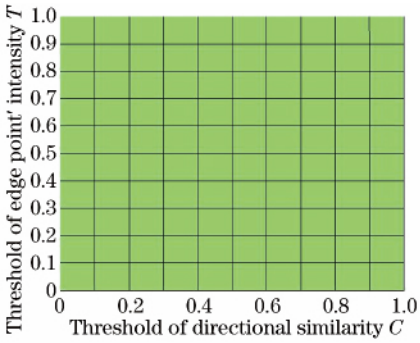

图 1　二维阈值平面

Fig. 1　Two-dimensional threshold plane

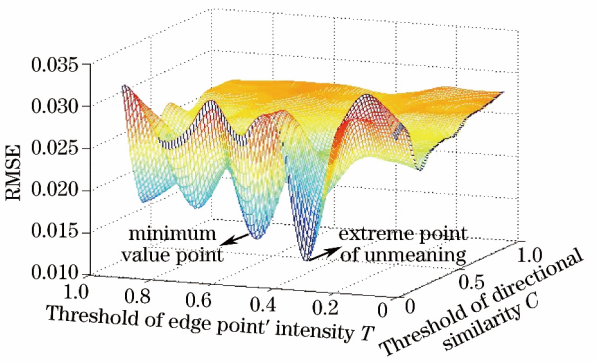

图 2　二维均方根误差曲面

Fig. 2　Two-dimensional root mean square error surface

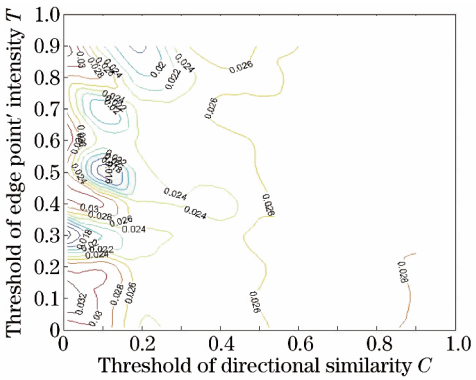

图 3　均方根误差曲面等高线

Fig. 3　Contours of root mean square error surface

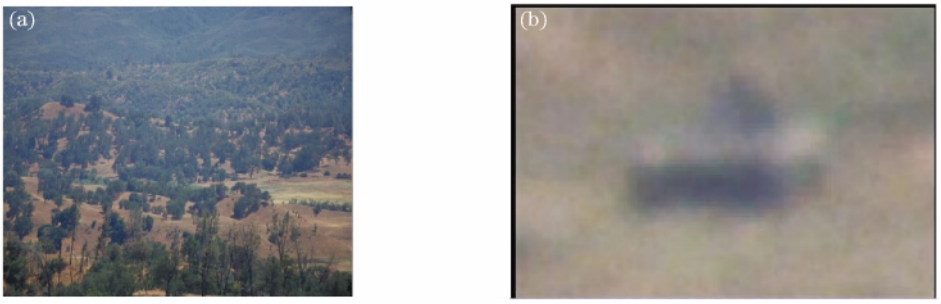

图 4　(a) Search_2 数据库中的第 8 幅图像；(b) 与图 4(a)对应的目标图像

Fig. 4　(a) Eighth image of Search_2 database; (b) target image corresponding to Fig. 4(a)

将杂波度量应用于 Search_2 数据库中的背景图象并基于度量值预测目标探测概率、虚警概率以及搜索时间，通过计算它们与主观数据的误差和相关性评价杂波度量的合理性。

虚警概率预测模型和搜索时间预测模型[27]分别为

$$F_{\text{pred}} = A - (X/X_{50})^E/(1 + X/X_{50})^E, \tag{5}$$

$$t_{\text{pred}} = x/(X + y), \tag{6}$$

式中 A 为 Search_2 数据库中图像的总探测概率($A=0.998$)，X 为杂波度量值，X_{50}、E、x 和 y 为最小二乘法拟合的优化参数。

待比较的杂波度量方法包括 SV、POE、TSSIM、CSFC_{MS} 以及 ORT。用于评价主观数据和预测值一致性的测度包括均方根误差、Pearson 线性相关系数(PLCC)和 Spearman 秩相关系数(SRCC)。由于文中研究的杂波度量方法基于人眼对单目标在复杂背景中的探测过程，评价实验中去掉 Search_2 数据库中第 7，15，23，26 幅图像(双目标图像)和第 39 幅图像(目标过小)。表 1～3 分别为基于各杂波度量的目标探测概率、目标虚警概率和目标搜索时间预测的误差分析和相关性分析，图 5～7 分别为对应的拟合曲线实验结果。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

从表 1～3 中可以发现，基于 TSSIM、$CSFC_{MS}$ 和 ORT 预测的探测概率、虚警概率和搜索时间与主观数据的均方根误差和相关系数都明显优于 SV 和 POE；从图 5～7 也可以发现，TSSIM、$CSFC_{MS}$ 和 ORT 的性能预测曲线与观察者的主观数据较好地拟合，而 SV 和 POE 具有较多偏离点。这表明 TSSIM、$CSFC_{MS}$ 和 ORT 的性能优于 SV 和 POE，其中 ORT 的性能最优，其预测的结果与主观数据符合度最高。

SV 和 POE 通过统计背景中的方差和边缘信息度量杂波，它们的性能较低表明忽略与目标的相似性无法准确地度量背景杂波；TSSIM 从亮度、对比度和结构信息三方面度量目标与背景的相似性，其准确性得到提高；$CSFC_{MS}$ 在频域度量目标和背景的相似度，并根据人眼对比度敏感函数对相似度进行加权，其性能较好表明引入人眼的响应特性可以有效提高杂波度量的精度；ORT 基于边缘点强度和方向度量背景的相似性，并通过最佳响应阈值模拟人眼的适应性响应过程，性能最高。

表 1　基于各杂波度量的目标探测概率获得的主观数据的拟合参数值和相关性参数值

Table 1　Fitting and correlation parameter values of subjective data based on target detection probabilities of different clutter metrics

Metric	Parameter				
	X_{50}	E	RMSE	PLCC	SRCC
SV	3.8739	4.0679	0.1513	0.4196	0.6432
POE	121.3247	0.7772	0.1387	0.4446	0.6398
TSSIM	0.2529	−3.9987	0.1357	0.5799	0.7100
$CSFC_{MS}$	0.0058	0.9908	0.1352	0.5831	0.7174
ORT	160.2000	3.0910	0.0835	0.7124	0.7444

表 2　基于各杂波度量的目标虚警概率获得的主观数据的拟合参数和相关性参数值

Table 2　Fitting and correlation parameter values of subjective data based on target false alarm rates of different clutter metrics

Metric	Parameter				
	X_{50}	E	RMSE	PLCC	SRCC
SV	5.9179	2.6791	0.0762	0.5924	0.5366
POE	4.5127	0.7856	0.0821	0.6180	0.5541
TSSIM	0.7002	15.7001	0.0830	0.6910	0.5450
$CSFC_{MS}$	0.0002	0.4260	0.0809	0.5676	0.6372
ORT	113.2000	2.0180	0.0691	0.7874	0.6753

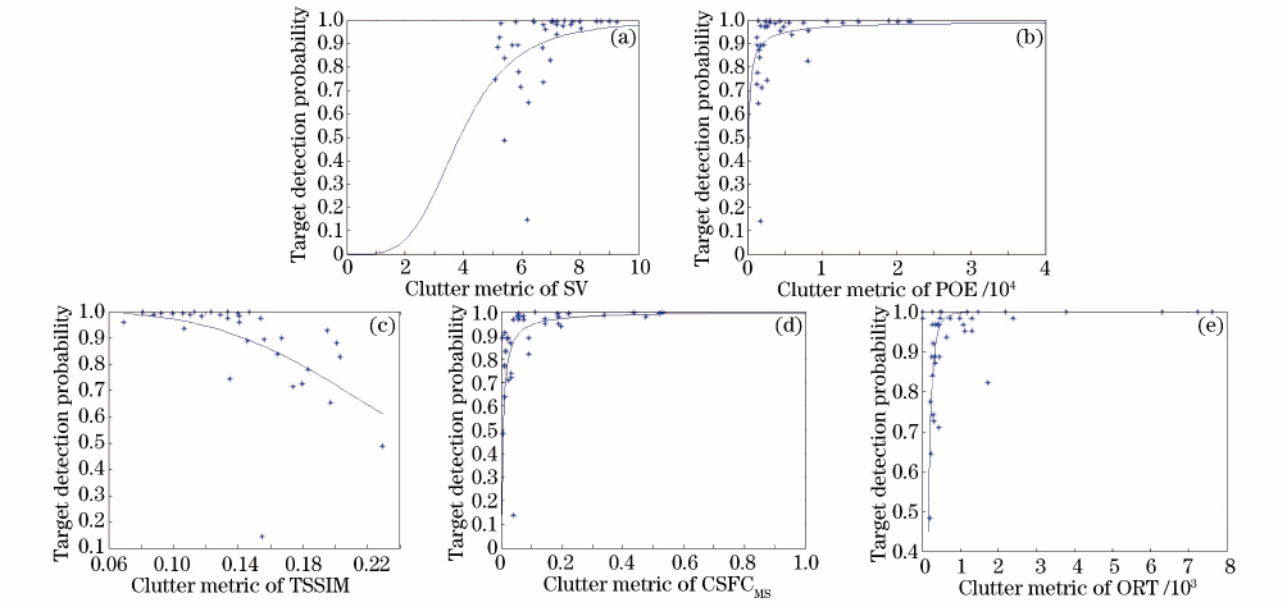

图 5　杂波度量值与目标探测概率的拟合曲线。(a) SV；(b) POE；(c) TSSIM；(d) $CSFC_{MS}$；(e) ORT

Fig. 5　Fitting curves of clutter metric and target detection probability. (a) SV; (b) POE; (c) TSSIM; (d) $CSFC_{MS}$; (e) ORT

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3　基于各杂波度量的目标搜索时间获得的主观数据的拟合参数值和相关性参数值

Table 3　Fitting and correlation parameter values of subjective data based on target search time of different clutter metrics

Metric	Parameter				
	x	y	RMSE	PLCC	SRCC
SV	8.3006	−2.0684	3.9075	0.4635	0.6583
POE	995.5600	58.4036	3.8601	0.6156	0.7505
TSSIM	0.5255	−0.7245	3.2510	0.4230	0.7562
$CSFC_{MS}$	0.9765	0.0839	4.3520	0.5302	0.6356
ORT	1480.0000	−119.7000	3.2321	0.7630	0.7710

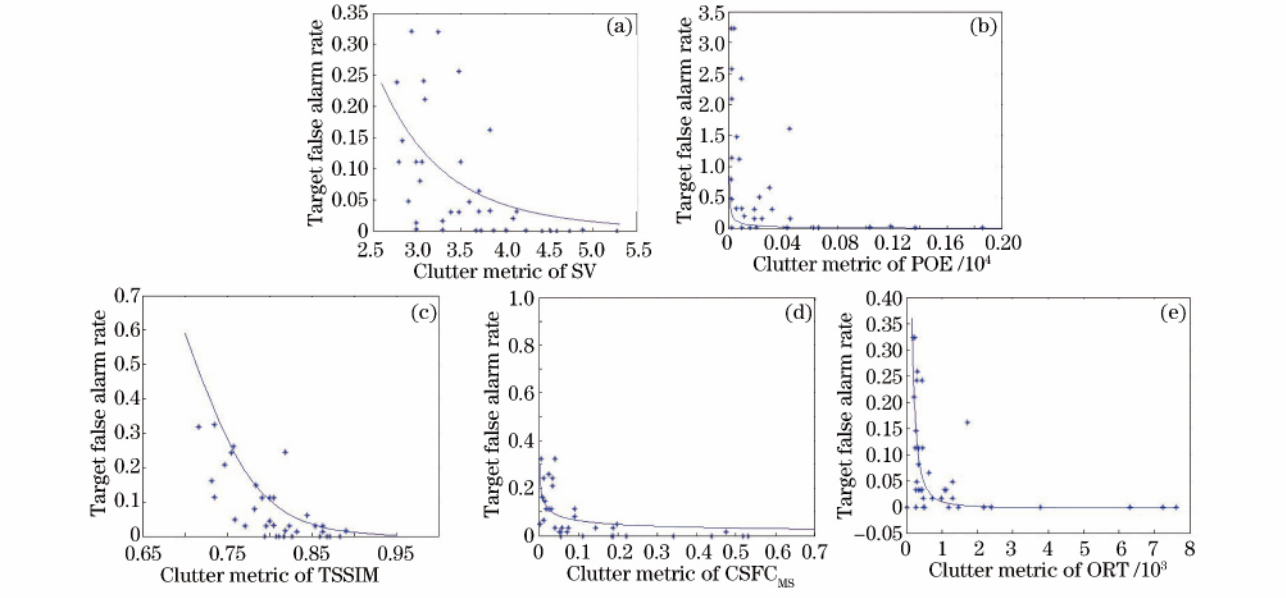

图 6　杂波度量值与目标虚警概率的拟合曲线。(a) SV;(b) POE;(c) TSSIM;(d) $CSFC_{MS}$;(e) ORT

Fig. 6　Fitting curves of clutter metric and target false alarm rate. (a) SV ;(b) POE ;(c) TSSIM ;(d) $CSFC_{MS}$;(e) ORT

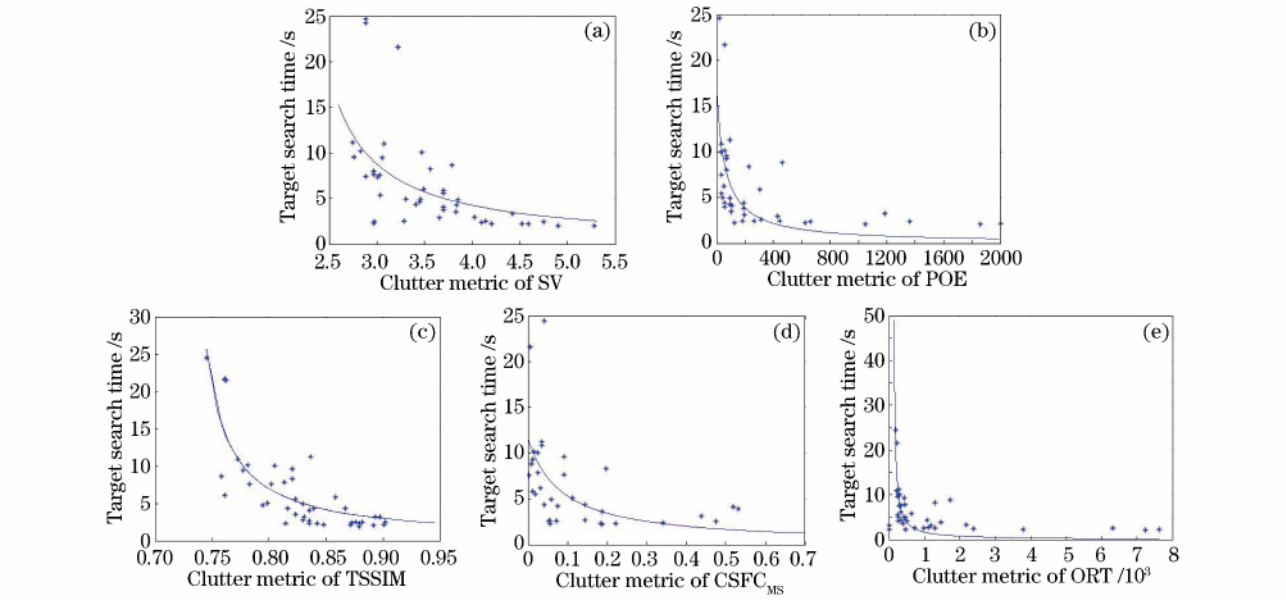

图 7　杂波度量值与目标搜索时间的拟合曲线。(a) SV;(b) POE;(c) TSSIM;(d) $CSFC_{MS}$;(e) ORT

Fig. 7　Fitting curves of clutter metric and target search time. (a) SV ; (b) POE ; (c) TSSIM ; (d) $CSFC_{MS}$; (e) ORT

尽管提出的杂波度量方法的预测结果与主观数据符合度较高，但在拟合曲线图中依然可以观察到明显的偏离点，这可能是由于图像中目标区域对比度的影响。图 8 为目标区域对比度和目标获取性能的预测误

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

差，图 8(a)为 Search_2 数据库中的图像，按对比度从低到高的顺序排列；图 8(b)～(d)分别为各图像的目标探测概率预测误差、目标虚警概率预测误差和目标搜索时间预测误差，它们的排列顺序与图 8(a)相同。为定量分析对比度对预测精度的影响，以图 8(a)中排序为第 20 位的对比度为界，将 39 幅图像分为高对比度和低对比度两类，比较高低对比度下的平均预测误差。图 8(b)中高对比度的平均预测误差为 0.0225，低对比度的平均预测误差为 0.0837；图 8(c)中高对比度的平均预测误差为 0.0232，低对比度的平均预测误差为 0.0672；图 8(d)中高对比度的平均预测误差为 2.2004，低对比度的平均预测误差为 2.9379。由此可以得出，目标区域的对比度与目标获取性能的预测精度有关，当目标区域对比度较低时预测精度较低，当目标区域对比度较高时预测精度也较高，上文的拟合曲线图中明显的偏离点为目标区域对比度较低的图像。可见，在度量杂波的同时考虑目标区域的对比度可以有效提高目标获取性能模型的精度。

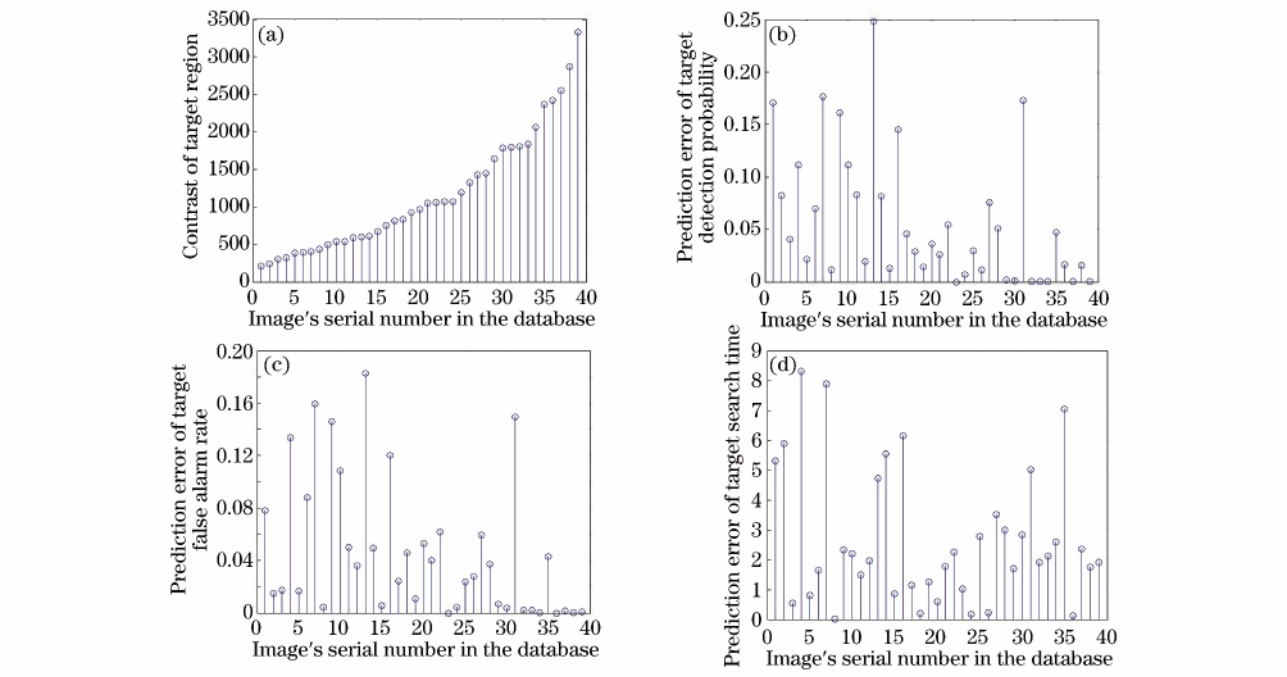

图 8　(a) 数据库中图像的对比度；(b) 目标探测概率预测误差；(c) 目标虚警概率预测误差；(d)目标搜索时间预测误差

Fig. 8　(a) Image contrast in the datebase; (b) prediction error of target detection probability; (c) prediction error of target false alarm rate; (d) prediction error of target search time

5　结　　论

基于人眼在选择过程中的适应性，提出了一种新的背景杂波度量方法。这种方法提取背景中边缘点方向和强度信息作为相似特征，建立背景的相似性图；应用二维阈值平面确定最佳响应阈值，利用该阈值模拟人眼对杂波响应的适应性；引入人眼响应的阈值模型，利用最佳响应阈值判断相似性对目标获取性能的影响进而完成背景杂波的度量。实验结果表明，在杂波度量中加入人眼响应模型可以有效地提高其度量精度；所提出的方法可以准确地度量背景对目标获取性能的影响，基于该方法的预测结果与主观目标获取性能数据符合度较高，且在目标探测概率、虚警概率和搜索时间方面的表现优于现有的背景杂波度量方法。

通过对拟合曲线偏离点的分析，得到目标区域的对比度影响获取性能的预测结果。今后的一项重要工作是建立对比度和杂波度量的联合模型，总体考虑背景和区域对比度对性能的影响，更大程度地提高目标获取性能模型的预测精度。

参　考　文　献

1　Zhang Jianqi, He Guojing, Liu Delian, *et al*. Impact of background clutter on IR imaging system performance [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(4): 565-568.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

张建奇，何国经，刘德连，等. 背景杂波对红外成像系统性能的影响[J]. 红外与激光工程，2008，37(4)：565-568.

2 Zhang Jianqi, Wang Xiaorui. Modeling and performance evaluating theory of photoelectric imaging system[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2010: 305.
张建奇，王晓蕊. 光电成像系统建模及性能评估理论[M]. 西安：西安电子科技大学出版社，2010：305.

3 Schmieder D E, Weathersby M R. Detection performance in clutter with variable resolution[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1983, 19(4): 622-630.

4 Tidhar G, Reiter G, Avital Z, *et al*. Modeling human search and target acquisition performance: IV. Detection probability in the cluttered environment[J]. Optical Engineering, 1994, 33(3): 801-808.

5 Biberman L M. Electro-optical imaging: system performance and modeling[M]. Bellingham: SPIE Press, 2000.

6 Walther D, Koch C. Modeling attention to salient proto-objects[J]. Neural Networks, 2006, 19(9): 1395-1407.

7 Xiao Chuanmin, Shi Zelin, Liu Yunpeng. Metrics of image background clutter by introducing gradient features[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(12): 3472-3479.
肖传民，史泽林，刘云鹏. 引入梯度分布特征的图像背景杂波度量[J]. 光学 精密工程，2015，23(12)：3472-3479.

8 Chang H H, Zhang J Q. New metrics for clutter affecting human target acquisition[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 361-368.

9 Li Q, Yang C, Zhang J Q, *et al*. Hidden Markov models for background clutter[J]. Optical Engineering, 2013, 52(7): 073108.

10 Yang C, Wu J, Li Q, *et al*. Sparse-representation-based clutter metric[J]. Applied Optics, 2011, 50(11): 1601-1605.

11 Walther D, Rutishauser U, Koch C, *et al*. Selective visual attention enables learning and recognition of multiple objects in cluttered scenes[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2005, 100(1-2): 41-63.

12 Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, *et al*. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.

13 Chu X Q, Cui Y, Li Q. Contrast-sensitivity-function-based clutter metric[J]. Optical Engineering, 2012, 51(6): 067003.

14 Mannos J, Sakrison D. The effects of a visual fidelity criterion of the encoding of images[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1974, 20(4): 525-536.

15 Xu D J, Shi Z L, Luo H B. A structural difference based image clutter metric with brain cognitive model constraints[J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 57: 28-35.

16 Mishra A K, Mulgrew B. Bistatic SAR ATR using PCA based features[C]. SPIE, 2006, 6234: 62340U.

17 Ferguson K. An adaptable human vision model for subjective video quality rating prediction among CIF, SD, HD and E-cinema[C]. 3rd Int Workshop Video Process Quality Metrics for Consum Electron (VPQM), 2007.

18 Li Q, Yang C, Zhang J Q. Target acquisition performance in a cluttered environment[J]. Applied Optics, 2012, 51(31): 7668-7673.

19 Toet A. Structural similarity determines search time and detection probability[J]. Infrared Physics & Technology, 2010, 53(6): 464-468.

20 Wang Shiyi, Wang Shuang, Zhang Libao. A road extraction algorithm with saliency analysis in high-resolution remote sensing images[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0210001.
王士一，王 双，张立保. 一种结合显著性分析的高分辨率遥感图像道路提取算法[J]. 光学学报，2015，35(2)：0210001.

21 Itti L, Baldi P. Bayesian surprise attracts human attention[J]. Vision Research, 2009, 49(10): 1295-1306.

22 Itti L. Models of bottom-up and top-down visual attention[D]. Pasadena: California Institute of Technology, 2000.

23 Rolls E T, Deco G. Attention in natural scenes: neurophysiological and computational bases[J]. Neural Networks, 2006, 19(9): 1383-1394.

24 Wilson D L. Image-based contrast-to-clutter modeling of detection[J]. Optical Engineering, 2001, 40(9): 1852-1857.

25 Toet A, Bijl P, Valeton J M. Image data set for testing search and detection models[J]. Optical Engineering, 2001, 40(9): 1760-1767.

26 Toet A, Biji P, Kooi F L, *et al*. A high-resolution image data set for testing search and detection models[M]. Soesterberg: TNO Human Factors Research Institute, 1998.

27 Chang H H, Zhang J Q, Liu D L. Modeling human false alarms using clutter metrics[C]. SPIE, 2007, 6786: 67863N.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net