

文章编号:1001-9014(2005)06-0450-05

# 背景杂波对经典人眼目标获取性能模型的修正

常洪花, 张建奇, 李勇

(西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:**背景杂波严重干扰到观察者的目标获取性能,当前的性能模型在背景杂波的表现方面存在诸多不足.本文基于边缘概率(POE)背景杂波量化尺度,利用人眼视觉搜索探测特性领域的最新研究成果,提出了一种对经典的NVESD模型进行修正的新方法,并对修正模型进行了初步的验证.

**关键词:**人眼目标获取;搜索;背景杂波;边缘概率

**中图分类号:**TN210 **文献标识码:**

## MODIFICATION OF THE BACKGROUND CLUTTER ON CLASSICAL HUMAN-EYE TARGET ACQUISITION PERFORMANCE MODEL

CHANG Hong-Hua, ZHANG Jian-Qi, LI Yong

(Institute of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Background clutter plays a very important role in the area of human-in-the-loop target acquisition. To model the target acquisition capability of an electro-optic system operated by a human, one should take into account how the clutter in the scene affects the human performance. Based on the classic probability of edge (POE) metrics for quantifying background clutter, and the up-to-date research findings in human visual perception, a new method for modifying NVESD's classic human target acquisition performance was proposed. And the modified model was preliminarily validated.

**Key words:** human-eye target acquisition; search; background clutter; probability of edge (POE)

### 引言

简单地讲,所谓的背景杂波就是图像中除掉目标和系统噪声之后,所剩余的部分.在机器视觉目标获取系统中,一般将杂波定义为干扰成像系统目标探测、跟踪性能的场景内容<sup>[1]</sup>.

在人眼视觉目标获取系统中,一般将杂波定义为图像中分散观察者注意力、干扰目标判定的部分<sup>[2]</sup>.杂波从2个方面大大降低了观察者的目标获取性能<sup>[3,4]</sup>:在目标搜索过程中,杂波会分散观察者的注意力,使观察者无法快速找到目标所存在的区域,增加了观察者的视场搜索时间;在目标定位过程中,杂波会干扰观察者对目标判定的准确性,降低观察者的探测概率.因而,完整的人眼视觉目标获取性能模型必须充分考虑背景杂波效应.

当前发展最成熟、应用最广泛的人眼视觉目标获取性能模型是美国夜视和电传感器管理局(NVESD,也就是人们所熟知的夜视实验室(NVL))所提出的系列模型(1975 NVL, FLIR92, NVTherm)<sup>[4,5]</sup>.其对背景杂波效应的考虑所采用的方法是以SV杂波量化尺度为基础,将探测准则分为3个等级来对系统性能加以修正. NVESD经典模型中这种对背景杂波的考虑方法存在着3个明显的不足:(i)Schmieder和Weathersby所提出的SV尺度是最早的背景杂波量化尺度<sup>[6]</sup>,该尺度适用于大多数的自然地形,但是对于人造物体较多的背景杂波(如城镇背景杂波图像)的量化不够准确.此外,该尺度与观察者对场景的感知效应相关性较小<sup>[3,6]</sup>. NVESD模型中以该尺度为基础对背景杂波进行量化分类,势必造成分类的不准确性;(ii)将

收稿日期:2004-12-06,修回日期:2005-05-20

Received date: 2004-12-06, revised date: 2005-05-20

基金项目:国家自然科学基金(60277005)和高等学校博士学科点专项科研基金(200030701003)资助项目

作者简介:常洪花(1980-),女,山东德州人,博士研究生,主要从事背景杂波干扰下的光电成像系统性能评估、各类图像质量的量化表征及图像处理算法效能的评估.

千变万化的自然背景对系统性能的影响粗略的用 3 个不同的探测准则来体现,反映了这种描述方法的不具体性;(iii)最后这种各类杂波环境下所建立的探测准则只是一种经验准则,并没有充分体现人眼在搜索探测过程中的基本特性.

本文将以此模型为基础,选择经过试验证实的边缘概率(POE)尺度来定量描述背景杂波,并以该尺度为基础,结合 G. Aviram 和 S. R. Rotman 在文献[7]中提到的对人眼视觉搜索探测特性的最新研究成果,提出一种包含背景杂波效应的新的人眼目标获取性能修正模型.需要说明的是,由于国外许多试验显示,杂波仅影响着人眼视觉成像系统目标探测性能<sup>[8]</sup>,因而我们仅对 NVESD 模型中的探测性能模型部分进行修正.

## 1 边缘概率背景杂波尺度(POE)

背景杂波量化尺度的发展是以人类视觉系统的研究成果为基础的.人眼视觉特性领域的研究表明<sup>[6]</sup>,当观察一幅图象或者照片时,人眼在无意识控制的情况下,会把眼睛集中在高对比度的区域.这里所说的高对比度区域包括图像中的高对比度扩展区域和边缘.此外,人眼还具有能够自适应的响应图象的亮度和所寻找的目标近似大小的能力.基于人眼的上述视觉特性,出现了多种背景杂波量化描述尺度,作者在近期的一篇文章中对其中几个典型尺度进行了具体的分析<sup>[9]</sup>.多次比较试验表明<sup>[3,6]</sup>,在现有各种杂波尺度中,以 POE 和 PS 尺度为最佳.这两个尺度都具有计算简单、且与观察者对场景的感知效应密切相关的优点.本文中将以其中的 POE 杂波尺度为例,讨论背景杂波对观察者目标获取性能的影响.

POE 尺度<sup>[10,11]</sup>中所衡量的图像杂波指的是图像中迷惑观察者,使观察者误以为在观察真实目标的物体;或分散观察者注意力,延长观察者发现目标所需时间的物体.该尺度是基于人眼集中观察图像中明显的边缘轮廓的特性而提出的,以图像中边缘点的数目来衡量杂波的强弱.在反映人眼对图像中的边缘部分比较敏感这一特性的同时,充分体现了人眼的自适应能力,确立了视觉探测系统与图像统计特性之间的关系.其具体计算过程如下:

1. 利用 Sobel 或其它边缘检测算子对图像进行边缘增强.
2. 将输出图像的强度值标准化到 0 ~ 255 之间.

3. 将得到的图像分成  $N$  个模块,每个模块的长宽均为目标相应长度的 2 倍.

4. 把第  $i$  个模块中超过阈值  $T$  的点数记为  $POE_{i,T}$ , 阈值  $T$  的经验值为该模块内平均灰度值的 0.7 倍.

5. 最后,整幅图像总的 POE 值为  $POE_{i,T}$  的均方根(RMS),可用数学公式表示为

$$POE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N POE_{i,T}^2} \quad (1)$$

其中, $POE_{i,T}$ 为图像中第  $i$  个模块内超过阈值  $T$  的边缘点数; $N$  为图像内的总模块数.

图 1(a)为一幅 SPIRIT 成像仪所拍摄的红外图像中的一部分,图像大小为  $304 \times 272$ , (b)为其二值图,经第 4 步阈值分割后得到的二值图及利用上述 5 个步骤计算得到的 POE 值.

我们知道,均方根也称作有效值,因而从物理意义上讲,边缘概率 POE 尺度实际上表示的是,图像内每个长宽为目标相应长度 2 倍的模块内,所包含的边缘点数的有效值.

## 2 经典的 NVESD 人眼视觉目标获取模型

经典的 NVESD 视场搜索模型为一个单指双参模型.该模型中认为目标的搜索探测概率为<sup>[8]</sup>

$$Pd(t) = P_{static} P_{search}(t) \quad (2)$$

其中, $P_{static}$ 为静态性能模型中目标的探测概率,也就是目标位于视场中心或至少观察者知道目标的大概位置时,对应的目标探测概率.实际目标观察时,观察者并不知道目标的具体位置,因而必须在视场内进行搜索, $P_{search}(t)$ 表示观察者搜索  $t$  秒后的条件探测概率.由于当  $t \rightarrow \infty$  时,  $P_{search}(\infty) \rightarrow 1$ , 此时的目标搜索探测概率  $Pd(\infty) = P_{static}$ ,因而也将  $P_{static}$  简记为  $P_{\infty}$ . 其数学表达式为  $P_{\infty}$ .

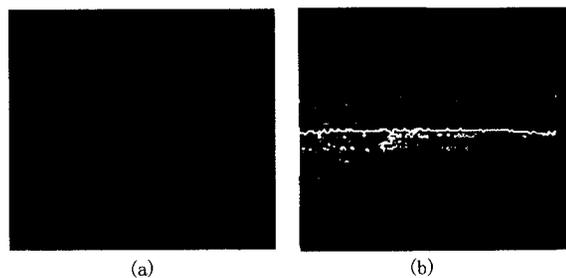


图 1 (a)原红外图像 (b)二值化后的图像(POE = 4.79)

Fig. 1 (a) A typical IR image and (b) the binary image with POE = 4.79

$$P_{\infty} = P_{\text{static}} = \frac{\left(\frac{N}{N_{50}}\right)^E}{1 + \left(\frac{N}{N_{50}}\right)^E}; E = 2.7 + 0.7 \frac{N}{N_{50}} \quad (3)$$

$$P_{\text{search}}(t) = 1 - e^{-t/\tau} \quad (4)$$

$\tau$  为平均目标获取时间,其标准计算公式为

$$\frac{1}{\tau} = \begin{cases} \frac{P_{\infty}}{3.4}, & \text{当 } P_{\infty} < 0.9 \text{ 时} \\ \frac{1}{6.8} \frac{N}{N_{50}}, & \text{当 } P_{\infty} \geq 0.9 \text{ 时} \end{cases} \quad (5)$$

文献[6]中指出,

$$\frac{N}{N_{50}} = \frac{\ln\left(\frac{\Delta T \sqrt{\varepsilon/7}}{MRT_0}\right) - R\beta_{\text{atm}}}{\frac{N_{50}}{s} \beta_{\text{sys}} R} \quad (6)$$

其中  $N$  为目标可分辨的周期数,  $N_{50}$  是 50% 探测概率时所要求的周期数. 该模型借助于 Schmiuder 和 Weathersby 以 SV 背景杂波量化尺度为基础所提出的信号杂波比 (SCR) 的概念<sup>[8]</sup>, 广义地把背景杂波按 SCR 分为 3 个区域: SCR > 10, 为低等级杂波; 1 < SCR < 10, 为中等级杂波; SCR < 1, 为高杂波, 并在上述 3 类典型的背景杂波环境中, 对特定目标进行观察试验, 获取 3 类杂波环境中各自对应的探测准则分别为: 低等级杂波对应的  $N_{50} = 0.75$ , 中等级杂波对应的  $N_{50} = 1$ , 高等级杂波对应的  $N_{50} = 3$ .

为后续论述方便起见, 下文中我们将不考虑背景杂波时的 NVESD 模型称为 NVESD 原经典模型; 将以 SV 背景杂波尺度为基础对探测准则修正后的模型称为 SV 修正模型; 将本文中所要提出的、以 POE 背景杂波尺度为基础修正后的模型称为 POE 修正模型.

### 3 基于边缘概率尺度的背景杂波修正模型

#### 3.1 理论基础

本文所要建立的 NVESD 修正模型的理论基础有 2 个: 首先, G. Aviram 和 S. R. Rotman 在文献[7]中指出, 当观察者位于目标位置附近时 (相当于静态探测时的情况), 其探测性能主要由目标的局部对比度决定; 观察者在没有目标位置的先验知识的情况下 (对应于目标搜索探测过程), 其探测性能主要由图像的整体杂波等级来决定. 其次, 对人眼视觉的研究表明人眼具有集中观察边缘区域的特性, 而对边缘概率 POE 尺度的实验验证也表明, 该尺度且与观察者对场景的感知效应密切相关, 从而进一步证实一步表明了人眼视觉对边缘点的敏感性.

#### 3.2 背景杂波对 NVESD 经典模型的修正

根据背景杂波的定义即可知道, 背景杂波会分散观察者的注意力, 使观察者把注意力放在到杂波物体上. 结合人眼对边缘点敏感的基本特性, 我们认为人眼视觉对目标的探测过程实际上是图像内边缘点之间的竞争过程. 再根据 G. Aviram 和 S. R. Rotman 于静态探测时的情况, 探测性能主要由目标的局部对比度决定; 目标搜索探测过程时, 探测性能主要由图像的整体杂波等级来决定的研究成果, 可以知道, 对于目标位于视场中心的静态探测过程而言, 这种竞争体现为目标上的边缘点与其局部背景上的边缘点之间的竞争, 背景杂波直接作用的结果是增加了目标探测的难度, 降低目标的探测概率; 对于搜索探测过程而言, 竞争则体现为目标上的边缘点与整个背景内边缘点之间的竞争, 背景杂波的直接作用是增加目标获取的时间. 基于上述思想, 我们提出了下面的修正模型, 用它们来描述背景杂波对静态目标探测概率和目标获取时间的影响

$$P_{\text{static}}(C) = \frac{\text{目标的边缘点数}}{\text{局部背景内的边缘点数} + \text{目标的边缘点数}} P_{\text{static}}, \quad (7)$$

$$\tau(C) = \tau / \left( \frac{\text{目标的边缘点数}}{\text{整个背景内的边缘点数} + \text{目标的边缘点数}} \right) \quad (8)$$

其中  $P_{\text{static}}$  和  $\tau$  分别是 NVESD 原经典模型中的目标静态探测概率和平均获取时间;  $P_{\text{static}}(C)$  和  $\tau(C)$  背景杂波修正后的目标静态探测概率和平均获取时间.

由式(7)看出, 目标上的边缘点相对于局部背景而言数量越多, 目标的竞争力就越强, 静态探测概率  $P_{\text{static}}(C)$  就越高; 当局部背景内的边缘点数为零时, 也就是目标局部背景中没有杂波时,  $P_{\text{static}}(C)$  前的修正因子为 1, 此时  $P_{\text{static}}(C) = P_{\text{static}}$ ; 也就 NVESD 原经典模型中的静态探测概率是修正后模型的在极限情况下的取值.

类似的, 由式(8)看出, 目标上的边缘点相对于整个背景而言数量越多, 目标的竞争力就越强, 目标获取时间  $\tau(C)$  越短; 当整个背景内的边缘点数为零时, 也就是整个场景内都没有杂波时,  $\tau(C)$  前的修正因子为 1, 此时  $\tau(C) = \tau$ ; 因而, NVESD 原经典搜索探测模型中的目标获取时间  $\tau$  是修正后模型在极限情况下的取值.

#### 3.3 基于 POE 尺度建立具体的修正模型

利用上文中 1.2 部分计算 POE 的方法得到如下结果: 目标上的边缘点数目为  $E_{\text{target}}$ , 图像内可分

为  $N$  个模块(长宽分别为目标的 2 倍),目标所在模块  $i_0$  内的边缘点总数为  $POE_{i_0,T}$ (包含目标上的边缘点数在内),最终的边缘概率值为  $POE$ ,由于边缘概率  $POE$  尺度实际上表示的是,图像内每个长宽为目标相应长度两倍的模块内,所包含的边缘点数的有效值.因而包含目标在内的,整个场景内的边缘点总数可表示为  $N \cdot POT$ .将上述各个具体的参量值代入式(7)和式(8)得到

$$P_{static}(C) = \frac{E_{target}}{POE_{i_0,T}} P_{static} \quad (9)$$

$$\tau(C) = \tau \left( \frac{E_{target}}{N \cdot POE} \right) \quad (10)$$

将式(9)和式(10)代入式(2)得到杂波修正后的目标搜索探测概率  $Pd(C,t)$  为

$$Pd(C,t) = P_{static}(C) P_{search}(C,t) = \frac{E_{target}}{POE_{i_0,T}} P_{static} \left( 1 - \exp\left(-\frac{E_{target}}{N \cdot POE} \cdot \frac{t}{\tau}\right) \right) \quad (11)$$

其中  $P_{static}$  和  $\tau$  均为 NVESD 原经典模型中不考虑背景杂波时的值(即  $N_{50} = 0.75$  时的值).  $E_{target}$  表示目标的边缘点数目,该值与目标的尺寸大小和形状共同决定.根据上文中 1.2 部分边缘概率尺度的定义可以知道, $POE_{i_0,T}$  表示包含目标在内、长宽各为目标 2 倍的区域内边缘点的总数,该值体现了目标局部背景的特性;而  $N \cdot POE$  则体现了目标整体背景的特性.结合式(4)、式(5)和式(6)可以看出目标的静态探测概率由目标与背景的温差  $\Delta T$ 、目标本身的形状、尺寸特性,和目标周围局部背景的特性共同决定;而搜索探测概率则由目标与背景的温差  $\Delta T$ 、目标本身的形状、尺寸特性、目标周围局部背景的特性、目标整体背景的特性及目标获取时间等多个因素等共同决定.

由此可见,本文中的  $POE$  修正与  $SV$  修正模型相比较有 3 个优点:(i) 所选择的  $POE$  背景杂波尺度较  $SV$  尺度更能充分体现出现象对场景的感知效应;(ii) 修正过程中以人眼视觉基本特性的最新研究成果为依据,而不是简单的参照经验准则;(iii) 确立了背景杂波与系统的目标获取性能之间一对一的对应关系,每种特定的背景杂波都会对应特定的目标获取性能,修正方法更加明确、具体.

#### 4 仿真计算结果与分析

下面我们将以图 1 所对应的典型系统及环境参数为例,利用背景杂波量化尺度  $POE$  修正后的目标

获取性能模型,对典型的系统及环境参数分别拟合得到不同固有温差对应的静态探测概率  $P_{static}(C)$  曲线(如图 2 所示),和不同搜索时间  $t$  对应的搜索探测概率  $Pd(C,t)$  曲线(如图 3 所示),并在同一坐标系中,标定出  $SV$  修正模型和 NVESD 原经典模型的计算结果,将三者进行比较.同时讨论背景杂波对系统性能的影响.系统及环境参数如表 1,表 2 所示.

根据上述修正模型中介绍的基本方法,得到图 1 中对应的总模块数  $N$ 、目标的边缘点数  $E_{target}$ 、包含目标的子模块内的边缘点总数  $POE_{i_0,T}$  及图像整体边缘概率值分别为  $N = 90, E_{target} = 80, POE_{i_0,T} = 120, POE = 4.79$ .

将上述各参量代入式(10)和式(11),得到该目标获取系统的静态探测概率和搜索概率表达式分别为

$$P_{static}(C) = 0.75 P_{static} \quad (13)$$

$$Pd(C,t) = 0.75 P_{static} \left( 1 - \exp\left(-0.18 \cdot \frac{t}{\tau}\right) \right) \quad (14)$$

表 1 外场环境参数

Table 1 Field environment parameters

| 背景温度 (K) | 目标温度 (K) | 目标宽度 (m) | 目标高度 (m) | 大气消光系数 (/km) | 距离 (km) |
|----------|----------|----------|----------|--------------|---------|
| 273.90   | 276.15   | 6.84     | 2.13     | 0.05         | 2.67    |

表 2 典型 FLIR 成像系统参数 (8~12μm)

Table 2 Typical FLIR imaging system parameters

| MRT <sub>0</sub> (°C) | β <sub>sys</sub> (mrad/cyc) |
|-----------------------|-----------------------------|
| 0.026 4               | 0.996                       |

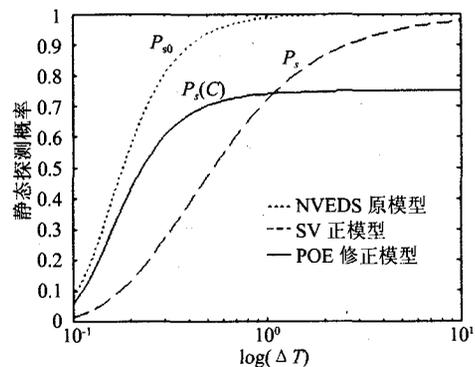


图 2 静态探测概率与固有温差的自然对数  $\log(\Delta T)$  之间关系曲线

Fig.2 Probability of static detection versus inherent temperature difference on a log scale  $\log(\Delta T)$

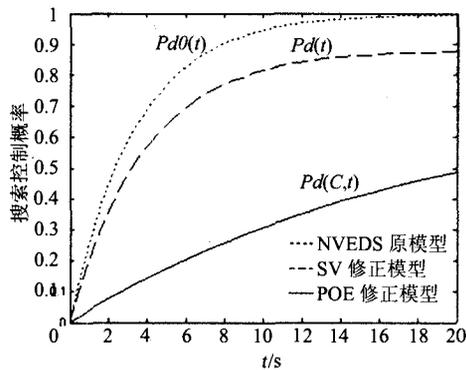


图3 搜索探测概率  $P_d(C, t)$  与搜索时间  $t$  (以 s 为单位) 的关系曲线

Fig.3 Search probability  $P_d(C, t)$  versus search time  $t$  (unit: s)

结合式(4)、式(5)和式(6)得到方程不同固有温差对应的静态探测概率曲线和不同搜索时间对应的搜索探测概率曲线分别如图2和图3所示,同时将 NVESD 原经典模型和 SV 修正模型对应的曲线标定在同一坐标系中。

图2中,对比  $P_0$  和  $P_s(C)$  曲线可以看出在同样的温差  $\Delta T$  下,背景杂波的存在明显降低了观察者的静态目标探测概率,从另一个角度来说,要想得到一定的目标探测概率,有背景杂波存在时,所需的温差大大增加。同时,由  $P_s$  和  $P_s(C)$  曲线的比较可以看出,当前的 NVESD 模型中,以 SV 为基础将探测准则  $N_{50}$  分为3个等级,来反映背景杂波对系统性能影响的方法,在固有温差较低时,会高估背景杂波对静态探测概率的影响(预测的探测概率过低),而在固有温差较高时,又会低估背景杂波对静态探测概率的影响(预测的探测概率过高)。

图3中,由  $P_d0(t)$  和  $P_d(C, t)$  的比较可以看出,在同样的搜索时间  $t$  内,背景杂波明显降低了目标搜索概率;同样,要想得到一定的目标搜索概率,有背景杂波存在时,所需的搜索时间大大增加。同时,由  $P_d(t)$  和  $P_d(C, t)$  曲线的比较可以看出,当前的 NVESD 模型中,以 SV 为基础将探测准则  $N_{50}$  分为3个等级,来反映背景杂波对系统性能影响的方法,会低估背景杂波对目标搜索探测概率的影响(预测的探测概率过高)。

## 5 结语

本文基于背景杂波量化领域经典的边缘概率

(POE)量化尺度,利用人眼视觉的基本特性和 G. Aviram 和 S. R. Rotman 对杂波环境中人类探测性能的最新研究成果,提出了一种对经典的 NVESD 人目标获取模型进行量化修正的新方法。搜索建立的修正模型具体量化考虑了背景杂波对人目标获取性能的影响,建立了背景杂波与系统目标获取性能之间一对一的关系。后续工作中需要进行相关的物理试验,以进一步验证并完善该修正模型。

## REFERENCES

- [1] Gillian K, Groves, Kim M, *et al.* Quantification of clutter in EO tracking systems [J], *SPIE Proceedings*, 1994, **2221**, 287—295.
- [2] Avital Z, Hadar Y, Reiter G, *et al.* The influence of clutter on human target acquisition [C]. *SPIE Proceedings*, 8th Meeting on Optical Engineering in Israel, 1992, **1971**: 436—446.
- [3] Rotman S R, Kowalczyk M L, Cartier J. Understanding infrared clutter through fixation point analysis [J]. *SPIE Proceedings*, 1994, **2223**: 126—138.
- [4] HU Fang-Ming, WANG Xiao-Rui, ZHANG Jian-Qi, *et al.* Modification of motion and background clutter on the IR imaging system performance model [J]. *Journal of Infrared and millimeter waves* (胡方明, 王晓蕊, 张建奇, 等. 运动效应和背景杂波对红外成像系统性能评估的修正. *红外与毫米波学*), 2004, **23**(1): 59—63.
- [5] Ratches J A, Richard H Vollmerhausen, Renolds G Driggers. Target acquisition performance modeling of infrared imaging systems: past, present, and future [J]. *IEEE Sensor Journal*, 2001, **1**(1): 31—40.
- [6] Lucien M Biberman. Electro-optical imaging system performance and modeling [J]. *SPIE Press*, 2000, **28**: 1—6.
- [7] Aviram G, Rotman S R. Evaluating of human detection performance of targets embedded in natural and enhanced infrared images using image metrics [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(4): 885—896.
- [8] Gerald C Holst. Electro-optical imaging system performance, second edition [J]. *SPIE Optical Engineering Press*, 2000: 397—398.
- [9] CHANG Hong-Hua, ZHANG Jian-Qi. Human visionbased quantitative characterization of IR clutter [J]. *Infrared technology* (常洪花, 张建奇. 基于人眼视觉的红外背景杂波量化技术. *红外技术*), 2004, **26**(5): 13—18.
- [10] Tidhar G, Reiter G, Avital Z, *et al.* Modeling human search and target acquisition performance: IV. Detection probability in the cluttered environment [J]. *Optical Eng.*, 1994, **33**(3): 801—808.
- [11] Rotman S R, Aviram G. Clutter metrics for prediction human target acquisition performance [J]. *SPIE Proceedings*, 2001, **4370**: 114—119.