

〈综述与评论〉

红外成像系统动态性能模型研究进展

王霞, 白江辉, 金伟其, 吴子牧

(北京理工大学 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 红外成像系统动态性能模型在军事领域具有广泛的应用前景。介绍了动态性能模型的3个模块: 目标背景数据输入、静态性能模型和搜索模型, 对各模块的内容和实现途径做了简单说明。按照动态性能模型的发展趋势, 分析了国外在搜索模型方面的主要工作, 介绍了国内动态性能模型的概况, 最后指出了动态性能模型发展方向和需要解决的问题。

关键词: 动态性能模型; 搜索模型; TDSP模型

中图分类号: TN216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2016)12-0997-08

Development and Research of Infrared Imaging System Dynamic Performance Model

WANG Xia, BAI Jianghui, JIN Weiqi, WU Zimu

(Key Laboratory of Photoelectric Technology and System, Ministry of Education of China, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The infrared imaging system dynamic performance model has promising application in military area. Three kinds of dynamic performance model are introduced in this paper, which include data input, static performance model and search model. Related work and approaches during each kind of model are also briefly described. In addition, according to the development history of dynamic performance model, a systematical conclusion on research done by foreign scholars is made. A succinct introduction to our current work is also presented. Finally, this paper points out the present problems on dynamic performance model. The developing trends are also prospected.

Key words: dynamic performance model, search model, TDSP model

0 引言

随着红外技术在军事中的广泛应用, 军用红外系统的性能直接影响到未来武器设计以及相关的军事行动战术的制定^[1]。动态性能评价模型是红外系统的总体技术之一, 能够综合评价红外系统的性能。动态性能评价模型主要包含静态性能模型和搜索模型两部分, 静态性能模型主要用于评估系统的成像质量, 作用距离等; 搜索模型主要用于红外系统目标侦察与搜索, 研究目标发现概率与发现时间的问题。

目前, 静态性能评价模型研究技术较为成熟, 搜索模型发展较为缓慢。一方面由于搜索问题的复杂性, 研究搜索模型主要是利用概率论和统计理论,

这2个理论都需要大量复杂的数学运算, 为建立模型增加了难度。另一方面, 搜索模型是以心理学实验数据为依据的, 因此模型都是在一定程度上的经验公式, 需要大量的实验验证, 客观上增加了研究的难度^[2]。

近年来研究者针对搜索模型展开了一些新的有益探索和研究, 提出一些新的观点和模型修正, 红外系统动态性能评价模型得到发展, 并用于指导军事目标侦察和搜索。本文将分析讨论动态性能评价模型的发展状况及其发展方向。

1 红外成像系统动态性能模型

红外成像系统动态性能模型是红外成像系统性

收稿日期: 2016-11-05; 修订日期: 2016-12-09.

作者简介: 王霞 (1972-), 女, 副教授, 博士生导师, 主要从事光电检测、光谱分析及微光与红外成像方面的研究。E-mail: angelniuniu@bit.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (61231014)。

能模型的一部分。动态性能模型研究的是^[3]：当已知目标位于某一搜索场景中时，在随时间增加中，热成像系统首先在场景中搜索到目标，然后由观察者在显示屏上发现或识别目标的概率的变化。从概念上很难说明动态模型的内涵，可以借助下面的例子来说明动态性能模型的研究内容。由光电系统在某一场景内发现了可疑目标，现在的任务是用某一热成像系统对该场景区域进行搜索，显然最关心的是能在多少时间内搜索到目标。如果某一系统所用的时间比较少，则很自然会认为该系统比较好。但实际中几乎不可能确定某一系统在多少时间内能发现目标，只能确定在某一时间内系统能够发现目标的概率是多少。这就是动态模型主要研究的内容，且很自然地会把这一概率值作为评价热成像系统性能好坏的一个指标。

红外成像系统动态性能模型实际上是对红外成像过程的数字化描述：红外成像系统在场景内搜索目标，目标辐射经大气传输到达成像系统通过光电转换和信号处理生成数字图像，观察者观察显示窗口搜索目标。可以把上述过程总结为如图1的3个模块：目标与环境模块、静态性能模块和搜索模块。

1.1 目标与环境

目标与环境模块是动态性能模型的输入模块，它包括2个方面的内容：目标与环境的参数输入和大气传输的计算。

红外成像仪实际探测到的是一个复杂景物图像，要精确地确定这一复杂图像是比较困难的，其涉及到目标、背景、环境、大气传输等及诸因素间的相互影响。因此在系统性能评价时，常采用一些能反映目标宏观特性的参数，如目标尺寸、相对于背景的等效温差条带图案（或目标与背景红外辐射之差）来表示目标特征^[4]。

模型化目标用一个相对背景温差为 ΔT 的矩形目标代替真实目标，其面积大小与实际目标相同，目

标温度为在整个目标信息区内温度对面积的加权平均值：

$$T_m = \frac{\sum A_i T_i}{\sum A_i} \quad (1)$$

式中： A_i 为目标信息面积元； T_i 为 A_i 面积元的温度； T_m 为目标加权平均温度。

于是，目标相对背景温度 T_b 的加权平均温差——等效温差 ΔT 为：

$$\Delta T = T_m - T_b \quad (2)$$

大气传输是指红外辐射在大气中的衰减。设黑体目标与背景之间的零视距（ $R=0$ ）温差为 ΔT_0 ，经过一段距离 R 的大气传输到达热成像系统时，目标与背景之间的等效温差 ΔT 可近似表示为^[4]：

$$\Delta T = \Delta T_0 \cdot e^{-\alpha(R) \cdot R} = \Delta T_0 \cdot \tau(R) \quad (3)$$

式中： $\alpha(R)$ 和 $\tau(R)$ 分别是在热成像系统工作波段内，目标方向 R 距离行程上大气传输的平均衰减系数和平均大气透射比。

大气传输衰减对实际成像系统性能的影响是很明显的，不同大气条件所产生的衰减有很大的差别，目前大气传输特性的计算采用美国LOWTRAN或MORTRAN软件，可以计算倾斜路程和众多大气条件下的大气传输性能^[4]。

1.2 静态性能模型

静态性能模型研究的是当已知的热图像存在于显示屏上时，在观察时间不受限制条件下，观察者能够发现或识别目标的概率^[3]。静态性能模型包含2方面内容：首先是评价函数，它从红外成像系统硬件参数入手，描述成像系统空间频率的变化特征，分析红外成像系统温度分辨力和空间分辨力特性。常用的指标包括调制传递函数(MTF)、噪声等效温差(NETD)、最小可分辨温差(MRTD)，最小可探测温差(MDTD)等^[5]；其次是探测概率估算准则，包括Johnson准则和TTP准则。Johnson准则是在对各种车辆的视觉心

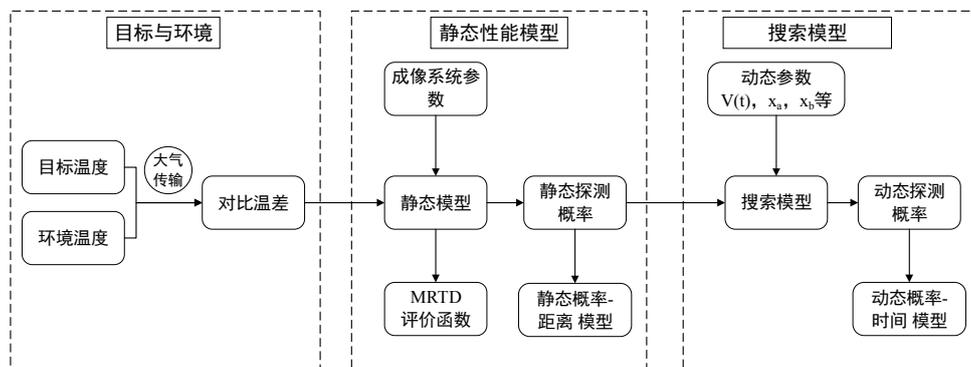


图1 红外成像系统动态性能模型仿真的3个模块

Fig.1 Three stages of the imaging infrared system dynamic performance model

理实验基础上建立的。根据实验把目标的探测问题用等效条带图案的探测问题联系起来,把视觉探测划分为4类,探测、定向、识别和认清。通常,不同探测水平受限制的物理机理不同,所以不同探测水平所需的条带数有较大的差别,对视距的影响也很大,以不同立场(系统设计、方案论证或性能指标确定等)分析热成像系统性能应统一探测水平。利用概率积分模拟及 Johnson 准则,可将条带数 N 与静态探测概率 P_{∞} 的关系拟合表示为^[4]:

$$P_{\infty} = \frac{(N/N_{50})^E}{1+(N/N_{50})^E} \quad (4)$$

式中: P_{∞} 为静态探测概率; N 为 Johnson 准则条件下目标条带数; N_{50} 为 50%分辨概率所需要的条带数, $E = 2.7 + 0.7(N/N_{50})$ 。

由于 Johnson 准则采用单一极限频率预测系统性能,未能充分显示系统整个通带中信号传递特性, NVESD (Army Night Vision Electro-optic Sensors Directorate) 实验室提出其改进模型 TTP 模型。TTP 模型对 Johnson 准则的改进表现在对大于人眼阈值对比度的图像频谱进行积分,其更深的寓意在于对噪声功率谱的影响分析。同时对影响奈奎斯特频率内频谱混淆的探测器填充率、采样率以及影响奈奎斯特频率外频谱恢复程度的数字插值处理也能进行有效预测^[5]。

总体看来,静态性能模型研究技术较为成熟,并且研究具有系统性、完整性。美国 NVESD 实验室红外仿真模型历经 FLIR75 模型^[6], FLIR79 模型^[7], FLIR90 模型^[8], FLIR92 模型^[9], NVTherm 模型^[10], NVThermIP 模型^[11], NV-IPM 模型^[12]等几代发展、改进和更新,能够对各种类型的红外成像系统性能做较为准确的预测和评估。除此之外,静态性能模型还有德国研究者 Wolfgang 提出的基于最小可感知温差 (MTDP) 的 TRM3 模型^[13], 荷兰 TNO 研究所提出的 TOD 模型^[14]等,这些模型均有较好的现场预测性能。国内关于静态性能的研究开始于 20 世纪 90 年代,较国外落后 20 年左右,整体水平相对落后。北京理工大学的金伟其研制了一代通用组件热成像系统性能评价软件包 SPTIS^[15]和二代热成像系统性能评价软件包 CFLIR^[16],提出了基于人眼视觉匹配的光电成像系统评价方法。艾克聪对微光和光电成像系统性能模型进行研究,推导了视距的预测公式^[17]。西安电子科技大学张建奇,研究和修正了性能预测模型 NVThermIP^[11]。虽然国内对红外成像系统静态性能有一定的研究和系统仿真,能够研制出系统仿真软件,但是国内大多数研究者研究的内容是对国外模型的引入和修正,很少有自己独立的模型,因此与先进国

家仍有不小技术差距。

1.3 搜索模型

搜索模型定义了对目标的搜索过程。观察者用某种成像探测器对某个区域的搜索通常包括以下步骤^[18]:由光电系统在某一场景内发现了可疑目标,观察员先用大视场镜头对该场景进行扫描,当类似于目标的特征出现时观察员选用小视场镜头确认是否是目标,如果是目标则目标被发现;如果不是目标则返回到大视场镜头继续观察场景^[19]。可把上述搜索过程总结为探测器搜索、热成像系统和人眼搜索 3 个模块(如图 2 所示)。探测器搜索模块中探测器在搜索视场进行扫描,使得目标进入探测器视场;热成像系统模块将探测器视场的图像经过光电转换生成红外图像;人眼搜索模块是搜索人员观察显示器上的红外图像目标,判断目标是否被发现。搜索模型主要讨论实际搜索过程所需要的时间,一般利用概率论和统计理论计算出某段时间内的目标发现概率^[3]。

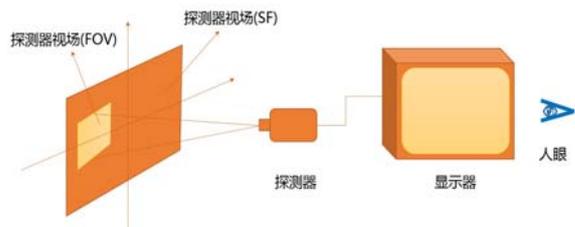


图 2 目标搜索系统仿真

Fig.2 Target search system simulation

2 红外成像系统搜索模型的发展现状

由于静态性能模型发展较为成熟,制约红外成像系统动态模型发展的主要因素为搜索模型。国外对于搜索模型的研究开始于 20 世纪 60 年代,主要是以军方为主。国外搜索模型均是以心理学实验数据为依据的,因此模型都是在一定程度上的经验公式。其实验数据主要来源于 2 个著名的心理学实验:开始于二战期间的 Blackwell-Tiffany 视学感知实验和有军事观察者参加的 NVESD 的野外测试试验 (field test trials)^[3]。搜索模型的研究大致可以划分为 4 个阶段,如图 3 所示。

2.1 Bailey-Rand 和 ACQUIRE 搜索模型

Bailey-Rand 搜索模型是 20 世纪 60 年代末^[3,20],由美国军方发起建立。在建立模型的过程中, Bailey 提出了一个极有价值的观点:模型的应用是限制在一定范围内的。1990 年美国 NVESD 实验室提出 ACQUIRE 模型,又称之为目标获取概率模型^[20-21]。该模型分成视觉搜索和物理搜索 2 部分,视觉搜索通过瞥见概率 p_0 和人眼积分时间 t_f 计算目标发现概率,

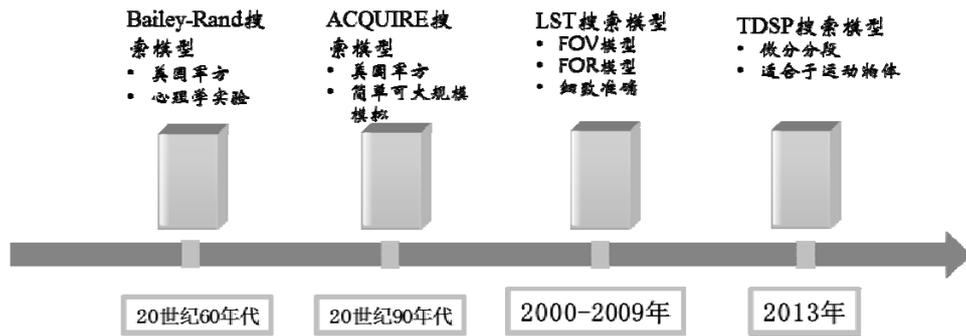


图3 搜索模型的研究进展

Fig.3 Development and research of search model

物理搜索引入参数 η , 整个概率表达式为:

$$P(t) = p_{\infty} \{1 - \exp[-p_0 t / (\eta t_f)]\} \quad (5)$$

式中: P_{∞} 表示正常观察者在无限长时间内发现目标人群的比率, 即静态探测概率; $\eta = SF/FOV$, 即物理搜索视场 (Search Field, SF) 与热成像系统视场 (FOV) 的比值, 如图2所示。

该模型的优点在于对系统完整细致的分析, 模型结构简单, 适合于大规模模拟, 因此得到广泛采用, 不断有人对此模型在适用范围上作了扩展^[22]。1991年, S. R. Rotman 等提出了存在障碍条件下的目标搜索模型^[23-24]。1993年, E. S. Gordon 等在标准 ACQUIRE 模型的基础上, 讨论了搜索策略和平均搜索时间^[25]。1997年, John D'Agostino 等对标准 ACQUIRE 模型中的平均搜索时间提出了新的模型^[26]。

ACQUIER 模型也有自身的缺点: ①模型过于简单, 无法反应不同环境下概率的变化, 精度不高; ②模型中观察者可以长时间搜索目标, 这与实际的搜索情景不符合; ③模型无法解答目标或者探测器运动的情况。基于上述原因, 研究者随后提出一系列改进模型。

2.2 TLS 搜索模型

时间限制 (Time-Limited Search 时间限制, TLS) 搜索模型是在 ACQUIRE 模型的基础上针对搜索时间和搜索环境改进的。时间限制是指, 观察者需要在给定的时间内完成目标搜索任务。根据搜索环境范围的不同可以划分为 FOV(field of view)模型和 FOR(field of regard) 模型。

2.2.1 FOV 搜索模型

2002年, NVESD 实验室 Timothy Edwards 等在 ACQUIRE 搜索模型基础上, 建立了 FOV (Field of View) 搜索的 TLS 搜索模型^[27-28], 其目标发现概率可表示为:

$$P(t) = p_{\infty} [1 - \exp(-\frac{t-t_d}{\tau_{FOV}})] \quad (6)$$

该模型对于整个搜索探测过程中影响探测时间的因素主要归纳为3部分^[29-30], 如图4所示。①整个场景存在平均探测时间 τ_{FOV} , 且 $\tau_{FOV} = 4.0 - 2.65P_{\infty}$; ②引入时间延迟 t_d , 公式中的 t 用 $t-t_d$ 代替, t_d 一般看作常量^[31]; ③在未探测到目标并将目光转移到下一视场之前, 检测当前视场所花费的时间。

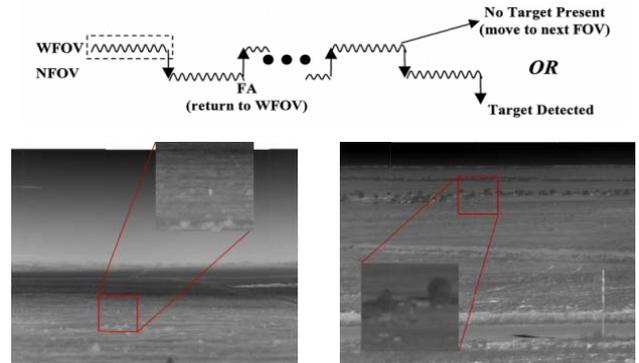


图4 Timothy Edwards 提出的 FOV 搜索过程

Fig.4 The FOV search by Timothy Edwards

由于 FOV 模型中 P_{∞} 和 τ_{FOV} 的关系是通过实验测定的, 其正确性有待进一步验证。因此研究者进行了一系列相关的验证实验: 2003年 Timothy Edwards 对 TLS 搜索模型在 FOV 区域进行了总结和整理, 修正了 τ_{FOV} 与 P_{∞} 的关系^[29]:

$$\tau_{FOV} = 3.5 - 2.5P_{\infty} \quad (7)$$

2004年, Nicole M. Devitt 等研究了城市背景下长波和中波波段的受限 FOV 区域搜索, 总结了长波、中波条件下在白天和晚上的 τ_{FOV} 与 P_{∞} 之间的关系^[32], 如表1所示。

2005年, David Wilson 利用微分方程方法讨论 τ_{FOV} 与 P_{∞} 的关系, 建议添加修正因子 β , 仿真数据与实验数据具有更好的一致性, 其修正公式为^[33]:

$$\tau_{FOV} = (A + B \cdot P_{\infty}) \times \beta \quad (8)$$

式中: A 、 B 为线性因子, β 为修正因子。

表1 τ_{FOV} 与 P_∞ 的经验公式

Table 1 Empirical formula of τ_{FOV} and P_∞

观察条件	经验公式
中波白天	$\tau_{FOV}=3.82-2.51P_\infty$
长波白天	$\tau_{FOV}=3.13-2.09P_\infty$
中波夜晚	$\tau_{FOV}=4.82-4.13P_\infty$
长波夜晚	$\tau_{FOV}=2.4-1.174P_\infty$

2.2.2 FOR 搜索模型

FOR 模型更适用于实际的搜索, 因为大多数的搜索活动都是发生在类似于 FOR 场景中。但是进行 FOR 搜索实验是十分艰难的, 需要占用大量的时间、空间和实验经费^[34]。实验室通常利用红外场景仿真的方法进行 FOR 实验^[35]。

2005 年, 美国 Eric Flug 等利用 NVESD 研制的红外场景仿真软件, 模拟了乡村夜晚的 FOR 场景, 采用 step-stare 方法将 FOR 划分为相互独立的 FOV 序列, 让观察者搜索仿真图像中的目标, 如图 5 所示^[34]。实验结果表明 step-stare 方法和区域随机搜索方法的目标发现平均时间十分接近, 随后 Melvin Friedman 理论推导了 step-stare 方法和随机搜索方法拥有一致的目标发现平均时间^[36]。Eric Flug 的实验表明了用仿真软件进行 FOR 模拟实验的可行性。

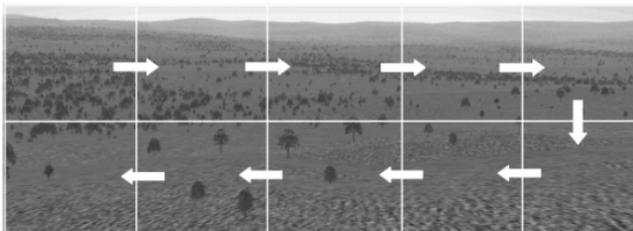


图5 FOR 模型 step-stare 方法搜索示意图

Fig.5 The step-stare method for the FOR search

2006 年, Dawne M. Deaver 研究了都市背景环境下长波和中波波段的 FOR 区域搜索^[37-38]。Dawne M. Deaver 分别模拟了白天和夜晚城市市场景中对军人目标的搜索情况。实验结果表明: 目标平均发现时间与将 FOV 扩展到 FOR 模型的预估平均发现时间一致。

2013 年, Melvin Friedman 总结了 FOR 模型的搜索情况, 建议采用平均时间 τ 来统一描述 FOV 和 FOR 区域, 并采用公式(9)描述 τ_{FOR} 与 τ_{FOV} 关系^[36]:

$$\tau_{FOR} = \frac{2 - P_s}{2P_s} (n - 1)t_0 + \tau_{FOV} \quad (9)$$

总体来看, FOV 和 FOR 模型代表了搜索模型发

展的一个新阶段。比起 ACQUIRE 模型^[37], TLS 模型将复杂的搜索环境划分为 FOV 和 FOR 两种类型, 在 FOV 区域中把搜索环境划分为城市, 乡村等不同背景, 区分了不同场景条件下的搜索问题, 在概率预测精度方面有所提高。同时, 由于搜索时长的限定, TLS 搜索模型比 ACQUIRE 模型具有更快发现目标的倾向, 这与大量实验结果吻合^[37]。因此研究者开始倾向于采用 TLS 模型来计算实际环境中目标搜索问题, 并对 TLS 模型在多目标、多观察者等方面上作了扩展研究^[39-40]。

2.3 TDSP 搜索模型

以上的搜索模型不适用于目标或者探测器相对运动的问题, 然而这是实际搜索中是经常遇到的情景, 也是实际搜索无法回避的问题。2009 年, NVESD 的 Melvin Friedman 等人尝试在 TLS 搜索模型的基础上采用分段微分的思想研究相对运动的情况^[41-42]。2011 年, Melvin Friedman 提出了搜索参数 (P_∞ 和 τ) 随时间变化的概念, 在 FOV 模型的基础上利用微分和迭代的数学方法推导了搜索概率函数^[43-44]。2013 年 Melvin Friedman 总结了目标探测器相对运动搜索问题, 建立了适用于相对运动的 Time Dependent search parameters (TDSP) 搜索模型^[36]。TDSP 模型的基本思想是微分分段然后迭代求和。首先把整段运动过程分割为无数个很小的 Δt 时间间隔, 假设在时间 Δt 内, 目标搜索参数 P_∞ 或者 τ 可以看作是恒定的, 在 Δt 内使用 TLS 的概率模型计算发现概率, 然后将整段运动过程累积求和, 计算总的发现概率。由于模型的复杂, Melvin Friedman 采用递归的方式来计算发现概率:

$$\begin{cases} P_0(0) = 0 & i = 0; \\ P_i(t) = P_{i-1}(T_i) + U[P_{\infty i} - P_{i-1}(T_i)] \{1 - \exp(-\frac{t - T_i}{\tau_i})\} & i = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (10)$$

式中: $U(t) = \begin{cases} t & t \neq 0 \\ 0 & t = 0 \end{cases}$ 为阶跃函数。

总体来看, TDSP 搜索模型优点是, 可以为更多复杂的搜索问题提供解决思路, 特别是当探测器或者目标存在相对运动的情况, 扩展了搜索模型适用范围。缺点是, TDSP 模型是基于实验总结和数学推理的结果, 缺乏足够的实验验证。同时 TDSP 搜索模型也较为复杂, 为验证工作带来一定困难^[45]。

2.4 国内发展状况

国内关于搜索模型的研究开始于 20 世纪 90 年代, 研究水平相对落后, 目前大多数研究者主要是对

国外模型的研究和应用,很少能提出自己的模型。西安电子科技大学张建奇研究小组,讨论了动态性能模型的3种模块:目标背景模块、图像处理算法模块和目标工作平台模块^[46]。国防科技大学蔡怀平等利用ACQUIRE搜索模型对坦克作战活动的目标进行了仿真研究^[47]。合肥工业大学洪兴勇等在研究视场外激光干扰图像对目标获取性能的影响分析时采用TLS模型计算探测概率^[48]。

北京理工大学一直致力于搜索模型的研究。CFLIR软件包对热成像系统动态性能进行了整理和研究,提出了相应的搜索模型CFLIR^[2]。祁蒙将ACQUIRE模型进行分析和改进,建立了红外周视搜索系统的概率计算模型^[49]。汪昊采用OSG集成渲染引擎开发了大规模场景实时红外仿真系统,为搜索模型的仿真验证创造了条件。目前笔者主要工作有3方面:

1)采用C++语言建立了FOV搜索模型仿真平台,计算典型静止目标的发现概率并与ACQUIRE模型比较,验证了FOV搜索具有更快发现目标的倾向,这与大量实验结果一致^[37],如图6(a)所示。

2)采用C++语言建立了FOR搜索模型仿真平台,用于计算大搜索范围中静止目标的发现概率,如图6(b)所示。可以看出,当搜索类似FOR区域,需要

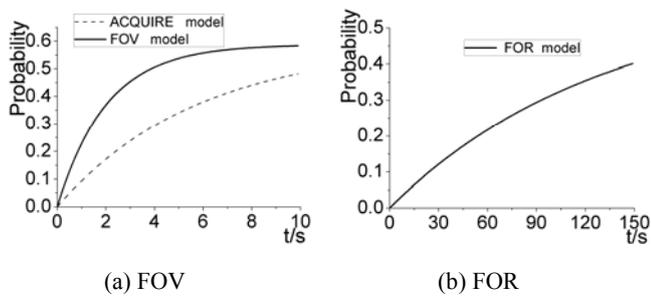


图6 FOV、FOR模型搜索概率与时间关系曲线

Fig.6 The probability curves of FOV and FOR model

较长的搜索时间。

3)采用C++语言建立了TDSP搜索模型仿真平台,用于计算典型运动目标的发现概率如图7所示。图7(a)为当目标逐渐接近探测器时发现概率随时间的变化曲线;图7(b)为当目标逐渐远离探测器时发现概率随时间的变化曲线。

3 结语

现代军事理论认为,以侦察监视技术、通信技术、成像跟踪技术、精确制导技术等为代表的军用高科技技术是夺取胜利的重要武器。红外成像系统动态性能模型对红外系统设计、红外系统性能评估和红外军事目标侦察与搜索具有重要指导意义。现阶段,国外学者通过一系列研究已建立了TLS模型和TDSP搜索模型,促进了该领域的发展。国内在此方面的研究不足,主要表现为研究比较分散,缺乏深入细致的研究,没有自己的模型理论,大多数研究者借助于国外的模型进行修正和改进,对模型修正与验证工作也缺乏系统有效的手段,这反映出国内重视程度不够的问题。随着红外科技的发展,如何将模型应用于实际目标搜索,如何验证模型和修正模型以提高模型的精度则是未来研究的重点问题之一。

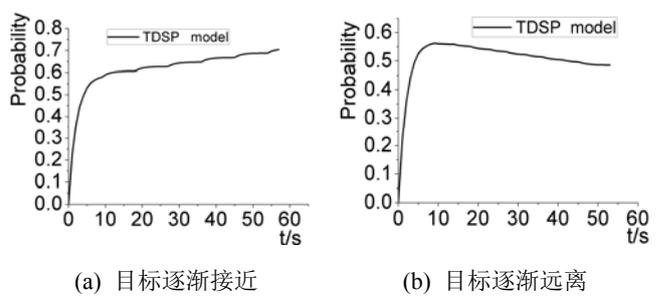


图7 TDSP模型概率与时间关系曲线

Fig.7 The probability curves of TDSP model

参考文献:

[1] Ratches J A, Vollmerhausen R H, Driggers R G. Target acquisition performance modeling of infrared imaging systems: past, present, and future[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2001, 1(1): 31-40.

[2] 仇谷烽, 高雅允, 金伟其. 热成像系统动态性能的研究[J]. *光学技术*, 2001, 27(4): 464-466

QIU Gufeng, GAO Zhiyun, JIN Weiqi. Study on dynamic performance of thermal imaging system [J]. *Optical Technology*, 2001, 27(4): 464-466

[3] 仇谷烽. 热成像系统静、动态性能的研究[D]. 北京: 北京理工大学,

2002.

QIU Gufeng. Thermal Imaging System of Static and Dynamic Performance of [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2002.

[4] 白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.

BAI Tingzhu, JIN Weiqi. *The Principle and Technology of Photoelectric Imaging* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006.

[5] 金伟其, 王吉晖, 王霞, 等. 红外成像系统性能评价技术的新进展[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(1): 7-13.

JIN Weiqi, WANG Jihui, WANG Xia, et al. New progress in

- performance evaluation of infrared imaging system[J]. *Journal of Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38** (1): 7-13.
- [6] Ratches J A, Swenson J M. Night Vision Laboratory Static Performance Model for Thermal Viewing Systems[R]. USA Electronics Command Report 7043, 1975: AD-A011212
- [7] Rosell F A. *The Fundamentals of Thermal Imaging Systems*[M].1979: AD-A073763.
- [8] Luck B Scott, Lesley R Condiff. C2NVEO Advanced FLIR Systems Performance Model[C]//*SPIE*, 1990, **1309**: doi:10.1117/12.21769.
- [9] Luck Scott, John D'Agostino. NVEOD FLIR92 thermal imaging systems performance model[C]// *SPIE*, 1992, **1689**: 194-203
- [10] Maurer T, Driggers, Freidman M. NVTherm Improvements[C]// *Proc. of SPIE*, 2002, **4719**: 15-23.
- [11] 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: 7-50.
- ZHANG Jianqi, WANG Xiaorui. *Optoelectronic Imaging System Modeling and Performance Evaluation Theory*[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2010: 7-50.
- [12] Brian Teaney, Joseph Reynolds. Next generation imager performance model[C]//*Proc. of SPIE on Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXI*, 2010, **7662**: 76620F.
- [13] Wittenstein W. Thermal Range Model TRM3[C]//*Proc. of SPIE*, 1998, **3436**: 413-424.
- [14] Piet Bijl, Mathieu Valetton J. A new method to characterize electro-optical system performance[C]//*Proc. of SPIE*, 1998, **3377**: 182-193.
- [15] 金伟其, 高稚允. 一代通用组件热像仪静态性能计算软件包 SPTIS[C/OL]// 95 年全国夜视热成像学术讨论会, 1995: 49-53.
- JIN Weiqi, GAO Zhiyun. General Component Thermal imager static performance calculation software package SPTIS[C/OL]// 1995 *National Night Vision Thermal Imaging Symposium*, 1995: 49-53.
- [16] 仇谷烽, 高稚允, 金伟其. 热像仪静态性能计算软件包 CFLIR2.0[J]. *北京理工大学学报*, 2000, **20**(6): 762-764.
- CHOU Gufeng, GAO Zhiyun, JIN Weiqi. thermal imager static performance computing suite CFLIR2.0[J]. *Beijing University of Technology*, 2000, **20** (6): 762-764.
- [17] 陈立学. 采样成像系统的传递性能分析[J]. *光学学报*, 1995(11): 1547-1551.
- CHEN Lixue. Transmission performance analysis of sampling imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995 (11): 1547-1551.
- [18] Edwards T C, Vollmerhausen R H, Driggers R G. NVESD time-limited search model[J]. *Proc. of SPIE on Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XIV*, 2003, **5076**: doi:10.1117/12.487143.
- [19] Maurer T, Wilson D L, Driggers R G. Search and detection modeling of military imaging systems[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(4):201-215.
- [20] Gary Waldman, John Wootton. *Electro-Optical Systems Performance Modeling*[M]. London: Artech House, 1992.
- [21] Ronald G Driggers, Paul Cox, Timothy Edwards. *Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems*[M]. London: Artech House, 1999.
- [22] Rotman S R, Gordon E S, Kowalczyk M L. Modeling human search and target acquisition performance: First detection probability in a realistic multitarget scenario[J]. *Optical Engineering*, 1989, **28**(11): 1216-1222.
- [23] Rotman S R. Modeling human search and target acquisition performance: simulating multiple observers in dynamic scenarios[J]. *Optical Engineering*, 1989, **28**(11): 1223-1226.
- [24] Rotman S R, Gordon E S. Modeling human search and target acquisition performance: Target detection in the presence of obscurants[J]. *Optical Engineering*, 1991, **30**(6): 824-829.
- [25] Gordon E S, Rotman S R. Search strategy and target acquisition performance[C]//*SPIE*, 1993, **1971**: 93-99.
- [26] John D'Agostino, Walter Lawson, David Wilson. Concepts for search and detection model improvements[C]//*SPIE*, 1997, **3063**: 14-22
- [27] Edwards T C, Vollmerhausen R H. Use of synthetic imagery in target detection model improvement[J]. *Nematology*, 1999, **1**(1): 55-59.
- [28] Jacobs E L, Edwards T. Sampling criteria for sensor simulation[J]. *Optical Engineering*, 1999, **38**(5): 827-835.
- [29] Edwards T, Vollmerhausen R H. Recent improvements in modeling time limited search[C]// *Proc. of SPIE*, 2002: 42-50.
- [30] 洪兴勇, 洪一, 徐银, 等. 视场外激光干扰图像对目标获取性能的影响分析[J]. *发光学报*, 2012, **33**(1): 62-67.
- HONG Xingyong, HONG Yi, XU Yin. Analysis of the influence of out-of-field laser interference image on target acquisition performance[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, **33**(1): 62-67.
- [31] Friedman M H, Reynolds J, Wilson D, et al. *Analytical Calculation for Probability of Detection Given time-dependent Search Parameters*[M]. 2011
- [32] Devitt N M, Flug E, Moyer S K, et al. Search comparison in the infrared spectra for military operations in the urban terrain[C]//*Proc. of SPIE*, 2004, **5407**: 217-225.
- [33] Wilson D, Devitt N, Maurer T. Search times and probability of detection in time-limited search[C]//*Proc. of SPIE on Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XVI*, 2005, **5784**: doi: 10.1117/12.604771 .
- [34] Flug E, Maurer T, Nguyen O T. Time limited field of regard search[C]//*Proc. of SPIE on the International Society for Optical Engineering*, 2005, **5784**: 216-223.
- [35] Wilson D L. Concepts for search and detection model improvements[C]// *Proc. of SPIE on Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing VIII*, 1997, **3063**: doi:10.1117/12.276081.
- [36] Friedman M. Fundamental search relationships and their application to field of regard search, search by multiple observers, search from a

- moving vehicle, and multi target search[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(4): 602-602.
- [37] Dawne M Deaver, Steve Moyer, Chun Ra. Modeling defined field of regard (FOR) search and detection in urban environments[C]//*Proc. of SPIE on Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XVII*, 2006, **6207**: doi: 10.1117/12.668001.
- [38] Devitt N, Moyer S, Flug E. Search comparison in the infrared and visible spectra in the urban terrain[C]//*Proc. SPIE on Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XV*, 2006, **5407**: doi: 10.1117/12.542171 .
- [39] Friedman M, T Du Bosq, Flug E. Analytical models quantify military benefit of collaborative search[C]//*Proc. of SPIE on Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXI*, 2010, **7662**: 76620B.
- [40] Friedman M H, Reynolds J. Collaborative search with independent sensors and multiple observers[C]//*Proceedings of SPIE on Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXII*, 2011, **8014**: 80140F.
- [41] Friedman M, Bosq T D, Reynolds J, et al. Comparison of perception results with a proposed model for detection of a stationary target from a moving platform[C]//*Proc. of SPIE on Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XX*, 2009, **7300**: 73000E.
- [42] Driggers R G, Jacobs E L, Vollmerhausen R H, et al. Current infrared target acquisition approach for military sensor design and wargaming[C]//*Proc. of SPIE on Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XVII*, 2006, **6207**: 620709.
- [43] Howe James D. *Electro-optical imaging system performance prediction*[M]. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook, edited by Michael C Dudzik, Bellingham, WA: SPIR Press, 1993, **4**: 106.
- [44] Friedman M H, Reynolds J, Wilson D, et al. *Analytical Calculation for Probability of Detection Given Time-dependent Search Parameters*[M]. 2011.
- [45] Friedman M H, Reynolds J P. Validating an analytical technique for calculating detection probability given time-dependent search parameters[C]//*Proc. of SPIE on Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIII*, 2012, **8355**: 835511.
- [46] 王晓蕊, 张建奇, 左月萍. 红外成像系统性能模型的研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2002, **31**(5): 399-403.
- WANG Xiaorui, ZHANG Jianqi, ZUO Yueping. Research progress of infrared imaging system performance model [J]. *Journal of Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31** (5): 399-403.
- [47] 蔡怀平, 刘靖旭, 陈英武. 基于 p_x 模型的目标搜索仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2005, **22**: 12-14.
- CAI Huaiping, LIU Jingxu, CHEN Yingwu. Study on target search simulation based on p_x model [J]. *Computer Simulation*, 2005, **22**: 12-14.
- [48] 洪兴勇, 洪一, 徐银, 等. 视场外激光干扰图像对目标获取性能的影响分析[J]. *发光学报*, 2012, **33**(1): 62-67.
- HONG Xingyong, HONG Yi, XU Yin. Analysis of the influence of out-of-field laser interference image on target acquisition performance [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, **33** (1): 62-67.
- [49] 祁蒙, 金伟其, 王春勇. 红外周视搜索系统的探测概率研究[J]. *红外技术*, 2003, **25**(2): 19-23.
- QI meng, JIN Weiqi, WANG Chunyong. Study on probing probabilities of infrared peripheral view search system [J]. *Infrared Technology*, 2003, **25** (2): 19-23.