

引用格式:王登位,李春荣,石文君.激光成像仿真及多维可分辨准则构建研究[J].电光与控制,2017,24(8):76-80,86. WANG D W, LI C R, SHI W J. Laser imaging simulation and multi-dimensional distinguishable criterion construction[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(8):76-80, 86.

激光成像仿真及多维可分辨准则构建研究

王登位¹, 李春荣², 石文君³

(1. 电子科技大学航空航天学院, 成都 611731; 2. 中国人民解放军93501部队, 北京 100061;
3. 空军第一航空学院航空弹药教研室, 河南 信阳 464000)

摘要: 针对依赖于人工判读且缺乏客观性的静态形式的二维 Johnson 准则所存在的问题, 提出了一种可利用计算机实现在线自动计算的多维可分辨准则。其主要目的为: 在激光成像条件下, 研究成像视角、距离分辨率(DR)、信噪比(SNR)及线对数(LP)对目标探测概率、识别概率和辨识概率的定量影响。给出了全空间形式的数据查询表格, 开发了3种具有一般普适性的识别与辨识算法, 并以高度逼真的曲面表达形式对准则的数据结果进行了可视化显示。最后, 给出了一组具有工程参考价值可分辨性准则结论。

关键词: 激光成像仿真; 多维可分辨准则; 距离分辨率; 信噪比; 线对数; 探测概率; 识别概率; 辨识概率
中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2017.08.016

Laser Imaging Simulation and Multi-dimensional Distinguishable Criterion Construction

WANG Deng-wei¹, LI Chun-rong², SHI Wen-jun³

(1. School of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. No.93501 Unit of PLA, Beijing 100061, China;
3. Aeronautic Missile Department, The First Aeronautic Institute of Air Force, Xinyang 464000, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of the static two-dimensional Johnson criteria of relying on manual interpretation and being highly subjective, we proposed a multi-dimensional distinguishable criterion, which can be calculated via computer online. The main purpose is to study the quantitative impacts of imaging angle, Distance Resolution (DR), Signal to Noise Ratio (SNR) and Line Pair (LP) on the probabilities of detection, recognition and identification in laser imaging. The data query form of total space style is given. Three recognition and identification algorithms that have universal nature are given, and the criteria results are visualized via highly realistic surface expression. Finally, a set of criteria conclusions that have high value of engineering reference are presented.

Key words: laser imaging simulation; multi-dimensional distinguishable criterion; distance resolution; signal to noise ratio; line pair number; detection probability; recognition probability; identification probability

1 概述

在目标探测与识别研究领域中, 操作人员通过成像系统将目标的解译分为发现、识别和辨识3个不同的等级或层次^[1-3], 这3个等级有着严格的定义, 它们之间的界限划分也是明确的。生物具有理解上述3个层次场景的能力, 特别是人类, 但其识别所依赖的基本

准则却一直是个谜。本文希望采用机器来实现这类功能, 为了达到此目的, 需要尽可能弄清并借鉴人类分辨目标所使用的基本准则。

JOHNSON进行了一项旨在考察人员发现、判断方向、识别和确认各种军事装备有关问题的试验研究^[4]。表1给出了用于发现、识别和确认的有关结论, 该结果以等效分辨能力(即线对数)的形式表示, 同时假设图像数据有适当的对比度和信噪比(SNR)。

另外, JOHNSON还领导了美国陆军夜视和电子遥感设备局(NVSED)的试验工作, 提出了地面目标特别是战术目标的发现、识别和确认对不同种类遥感器的

收稿日期: 2016-08-30

修回日期: 2016-09-23

基金项目: 中央高校基本科研业务费(ZYGX2015KYQD032)

作者简介: 王登位(1982—), 男, 贵州遵义人, 博士, 讲师, 研究方向为目标光学成像仿真与识别。

要求。考虑图1中的目标及其等价靶标,JOHNSON确定了执行不同级别区分任务所需要的目标跨越线对数或周期数。在不进行长度校正的条件下,NVSED进一步的试验也得到了类似的结果。长度校正是对目标长度求平方根来改善目标信号。Johnson准则是一种基于观察者群体对目标可探测性、可识别性、可辨识性的平均统计准则,其结论的得出均基于人工判读,缺乏客观的,计算机可操作、可计算的准则,更缺乏适用于激光成像制导的目标可分辨性准则。同时,其形式不便于计算机自动处理,必须对其改造,进行数学模型化、量化以便于计算机自动处理。

仔细考察Johnson准则可以发现,抛开人的智能判断,直观地看就是一个空间最低分辨率准则。故可直接将Johnson准则推广到3D,4D和5D目标图像(序列)在多维空间中的最低分辨率准则。在此基础上,将人的判断用计算机算法实现,即可达到对可分辨性准则的构建。

本文以仿真的激光图像为数据源,研究成像视角因素、距离分辨率(DR)因素,信噪比(SNR)因素及线对数(LP)因素对目标探测概率、识别概率和辨识概率的定量影响。

表1 Johnson准则(50%的正确率)

Table 1 Johnson criteria (50% correct rate)

目标(侧视)	最小维方向的分辨率			
	发现	确定朝向方位	识别	确认
卡车	0.9	1.25	4.5	8.0
M-48 坦克	0.75	1.2	3.5	7.0
Stalin 坦克	0.75	1.2	3.3	6.0
Centurion 坦克	0.75	1.2	3.5	6.0
半履带式坦克	1.0	1.5	4.0	5.0
吉普车	1.2	1.5	4.0	5.0
指挥车	1.2	1.5	4.3	5.5
战士(直立)	1.5	1.8	3.8	8.0
105 榴弹炮	1.0	1.5	4.8	6.0
平均	1.0±0.25	1.4±0.35	4.0±0.8	6.4±1.5

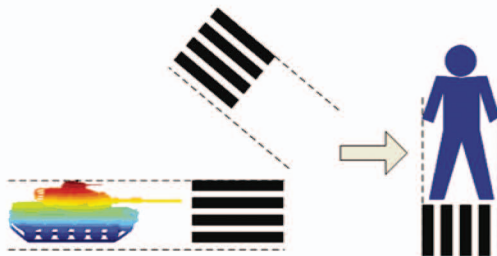


图1 目标及其对应的杆状靶标

Fig.1 Target and its corresponding target bacilliform drone

2 激光成像仿真

2.1 3ds文件架构解析

在仿真过程中所用的三维模型是3ds格式的文

件。3ds文件是一种网格形式的点云数据,其在经过自定义类“@model3d”^[5]读入并解析后可知模型由以下域组成: {name, vertices, facetidx, facets, ambient, diffuse, specular, shininess, shinystrength, transparency}。对于仿真过程来说,实际用到的域为vertices及facetidx。其中,vertices表示顶点的三维坐标,facetidx表示三角形平面索引,即三角形的3个顶点是由哪3个顶点组成的。

2.2 仿真流程

仿真过程由如下的2个步骤组成。

1) 根据传入的成像姿态参数平移和旋转模型,其执行过程由如下3个步骤组成:①将模型中心平移到坐标原点;②将模型中心平移到视点位置;③关于指定的轴及旋转角度旋转模型。

2) 根据旋转后的模型逐像素填充焦平面阵列。焦平面的每一个格子对应一个像素位置,接下来要做的就是往每一个格子中填充正确的像素值。

2.3 噪声模拟

依据距离像噪声特点,通过人为加噪,就可以获得不同条件下较为逼近真实激光成像雷达距离像的仿真图像,然后设计不同的算法对其进行处理,从而方便了算法的研制。

将模拟平方率包络检波器的离散输出作为其出发点,离散的结果为 N 个距离单元,其中1个是对应实际距离值的距离单元,其余 $N-1$ 个则是不含实际距离值的噪声单元。对于每一个将要被仿真的像素,峰值探测功能主要是通过产生 X_1 与 X_2 这两个随机变量来完成的。 X_1 代表实际距离值所在的距离单元 N_0 的强度,是服从均值为 $2 + R_{s,N}$ ($R_{s,N}$ 表示信噪比)的指数分布的随机变量; X_2 代表其余 $N-1$ 个噪声单元的强度的最大值,这 $N-1$ 个噪声单元的强度值均是服从均值为1的指数分布的随机变量,且独立同分布。 X_1, X_2 的获取可以通过以下途径:计算机产生在区间 $[0, 1]$ 上服从均匀分布的两个独立同分布的随机变量 U_1 和 U_2 ,即

$$X_1 = -(2 + R_{s,N}) \times \ln(1 - U_1) \quad (1)$$

$$X_2 = -\ln(1 - U_2^{N-1}) \quad (2)$$

对于强度图像,其第 n 个像素的强度值为 $I_n = \max(X_{1n}, X_{2n})$;而对于距离像还需判断是否有距离反常发生:若 $X_{2n} > X_{1n}$,则发生了距离反常,此时的距离值在除 N_0 以外的其余 $N-1$ 个噪声单元上均匀分布;若 $X_{2n} < X_{1n}$,则没有距离反常发生,此时的距离值即实际距离值 N_0 。

2.4 距离波门的执行机制

激光成像相对于红外成像的一个非常显著的优势在于前者是主动成像,而后者是被动成像。主动成像这个特性使得激光体制下的成像过程带有一定的智能

性,即可以对目标场景进行有针对性的筛选,从而达到在信息处理流程的最前端(及数据获取端)滤除掉大量的背景干扰,最大限度地简化后续的检测及识别等信息处理任务。经过 2.2 节的仿真流程后,得到了一个表征目标模型表面距离信息的距离矩阵,对于当前的距离单元,是否保留为有效取决于如下的判断:若当前距离值位于所设置的距离波门的下限与上限之间,则予以保留;否则,视为无效(将其距离值强制为距离波门下限)。

图 2 所示为距离波门操作在一个飞机模型上执行前后的对比情况。从执行后的图像可以发现,其中左上角及右下角的部分场景已经被筛选掉了。

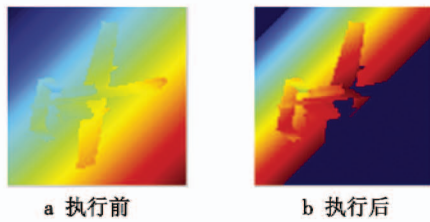


图 2 距离波门执行前后之情况对比
Fig. 2 Image before and after the execution of the range gate

2.5 轮廓锯齿模拟

激光的特性决定了它在目标的边缘处是有可能测不准的,具体反映在图像上表现为在图像边缘处会呈现出锯齿状。采取如下的方式来模拟锯齿的存在:利用 Matlab 的 `randsrc` 函数生成取值为 0 和 1 且大小与距离像一致的随机矩阵,扫描距离像,若当前位置属于距离像的外轮廓,则以当先位置为中心构建一个 $k \times k$ 大小的局部邻域,对于位于轮廓多边形内部的像素,若随机矩阵的取值为 1,则将结果矩阵中的该位置赋为 0,否则保留为原始像素值,同时,通过控制取 1 的概率即可达到对锯齿强度的控制。

图 3 所示为轮廓锯齿模拟操作在一个飞机模型上执行前后的对比情况。

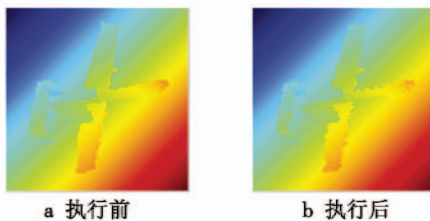


图 3 轮廓锯齿实例
Fig. 3 Contour sawtooth instance

3 辨识与识别算法

3.1 基于 PCA 特征空间映射的识别与辨识算法

主成分分析的基本思想就是通过降维、正交化和

能量最大化这 3 个步骤,将原本统计相关的 M 个初始数据变成 $L(L < M)$ 个相互正交的主分量,这些主分量的能量之和近似等于原 M 个初始数据的能量之和。

基于 PCA 特征空间映射的识别与辨识算法由两个阶段组成:一个为建立模板数据库阶段;另一个为识别与辨识阶段,分别如图 4a 和图 4b 所示。

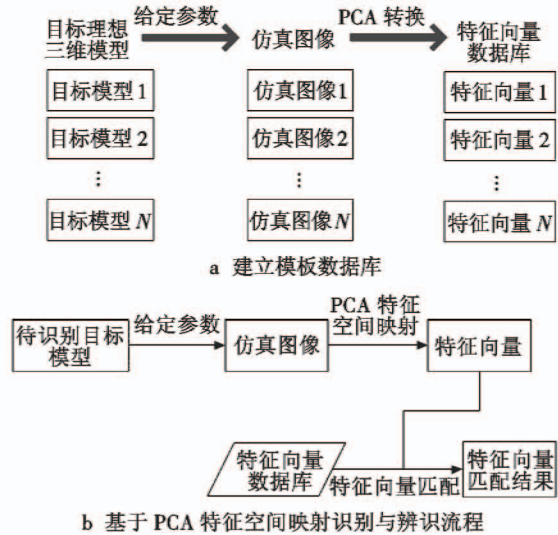


图 4 基于 PCA 特征空间映射的识别与辨识算法
Fig. 4 Recognition and identification algorithm based on PCA feature space mapping

3.2 基于图像灰度特性的识别与辨识算法

由于是在多个控制因素下进行正交试验,并输出最终的识别与辨识结果跟控制因素之间的多元非线性映射关系,因此,可以采用一种更为简单的识别与辨识算法,即在数据类型预测阶段,对仿真过程施加一系列的畸变操作,将得到的结果同模型数据库进行灰度层面上的匹配操作即可,其中,建立模板数据库流程如图 5a 所示,识别与辨识流程如图 5b 所示。

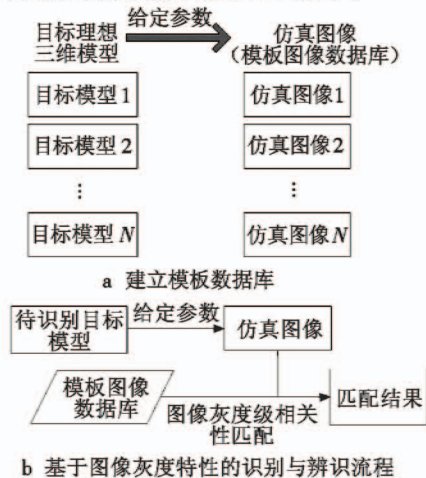


图 5 基于图像灰度特性的识别与辨识算法
Fig. 5 Recognition and identification algorithm based on image gray characteristic

4 试验结果

基于前述的激光成像仿真机理及目标辨识与识别算法,在 4 大类共 35 种目标上进行了正交试验,所考虑的控制因素包括 DR,SNR,LP 及成像视角。下面首先给出激光成像仿真的示例性结果,然后给出各种控制因素对于可分辨准则结果的定量影响。

4.1 激光成像仿真实例

图 6 所示为在 3 个模型上的激光成像仿真情况。其中,模型 1 成像参数为:信噪比 120 dB,仿真距离 3000 m,俯仰角 45°,方位角 45°,角分辨率 0.21 mrad。模型 2 成像参数为:信噪比 120 dB,仿真距离 1000 m,俯仰角 45°,方位角 45°,角分辨率 0.21 mrad。模型 3 成像参数为:信噪比 120 dB,仿真距离 2000 m,俯仰角 45°,方位角 135°,角分辨率 0.21 mrad。

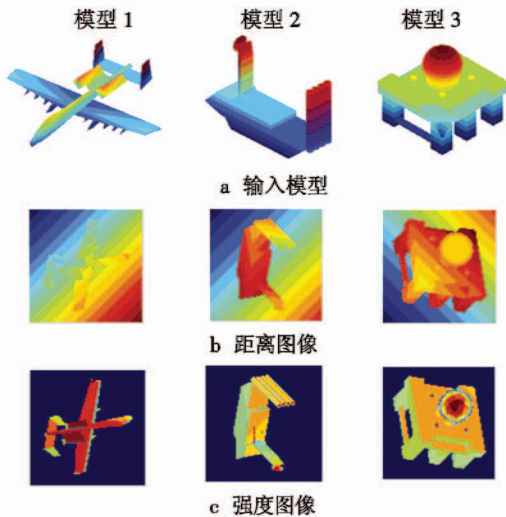


图 6 在 3 个模型上的激光成像仿真情况

Fig.6 Simulation situation of laser imaging on three models

4.2 探测概率与 SNR 和 LP 之间的关系

所有的激光雷达系统都建立了一定的标准来探测回波信号的存在,这些准则通常采取电压阈值的形式。如果信号(和噪声)超过了这个阈值,则表明一个信号已经被探测到,然而,即使没有返回信号,有限概率的存在也会使得噪声超过此阈值。信号和噪声超过阈值的可能性称为探测概率。

对于一组给定的信号和噪声,信噪比、探测率及虚警率之间是唯一确定的,即指定其中任意 2 个可以得到第 3 个量。高斯白噪声下的正弦、非脉动信号的探测率为

$$P_d = \frac{1}{\pi} \int_{V_T}^{\infty} x \exp\left\{-\left[\frac{x^2 + A^2}{2}\right]\right\} \left[\int_0^{\pi} \exp(xA \cos y) dy\right] dx \quad (3)$$

式中: $A = (2 \times R_{s,N})^{1/2}$; $V_T = [-2 \ln(P_{fa})]^{1/2}$, P_{fa} 为虚警

率; x 和 y 为积分变量。对于常值振幅信号,图 7 描述了 SNR 与 P_d 之间在不同虚警率下的函数关系曲线。

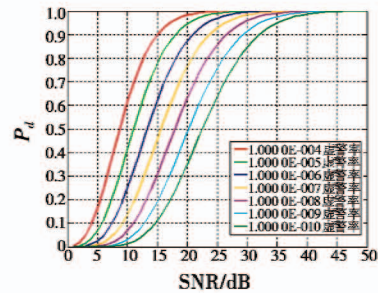


图 7 SNR 与 P_d 之间在不同虚警率下的函数关系曲线

Fig.7 Function relation between SNR and P_d under different false alarm rates

由于求式(3)的解析解存在困难,所以通常用数值计算或者近似的方式得到上述方程的解。因此单点探测率为

$$P_d = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left\{ \left[\frac{1}{2} + R_{s,N} \right]^{1/2} - \left[\ln \left(\frac{1}{P_{fa}} \right) \right]^{1/2} \right\} \right) \quad (4)$$

该近似方式适用于激光雷达设计和分析的大多数情况。尽管对于小的信噪比,式(3)和式(4)之间的相对差异很大,但大量的数值研究已经证实,只要 $10^{-12} < P_{fa} < 10^{-3}$ 且 $R_{s,N} > 2$,式(3)的绝对误差就会小于 0.02,激光雷达系统很少在此范围之外操作运行。

将上述单点探测概率推广到多点就有如下的多点探测概率算式

$$P = 1 - (1 - P_d)^{L_p} \quad (5)$$

式中, L_p 表示线对数(LP)。

图 8 所示为探测概率与 SNR 和 LP 之间在不同虚警率条件下的曲面拟合关系。

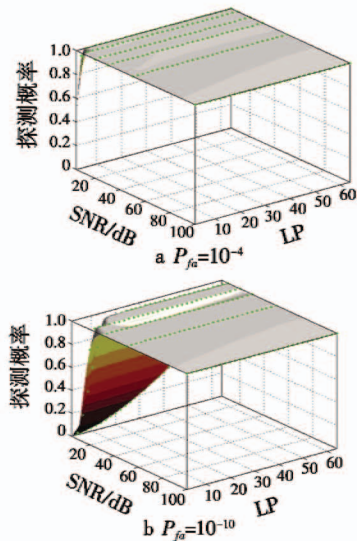


图 8 探测概率与 SNR 和 LP 之间在不同虚警率条件下的曲面拟合关系

Fig.8 Surface fitting relation of detection probability with SNR and LP under different false alarm rate

识别概率与 LP, SNR 和 DR 之间的关系如图 9 所示。

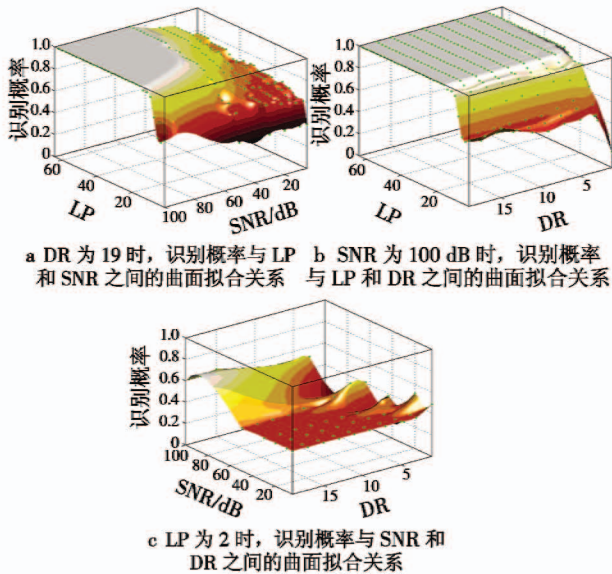


图 9 识别概率与 LP, SNR 及 DR 之间的曲面拟合关系

Fig. 9 Surface mapping relationship of recognition probability with LP, SNR and DR

辨识概率与 LP, SNR 及 DR 之间的关系如图 10 所示。

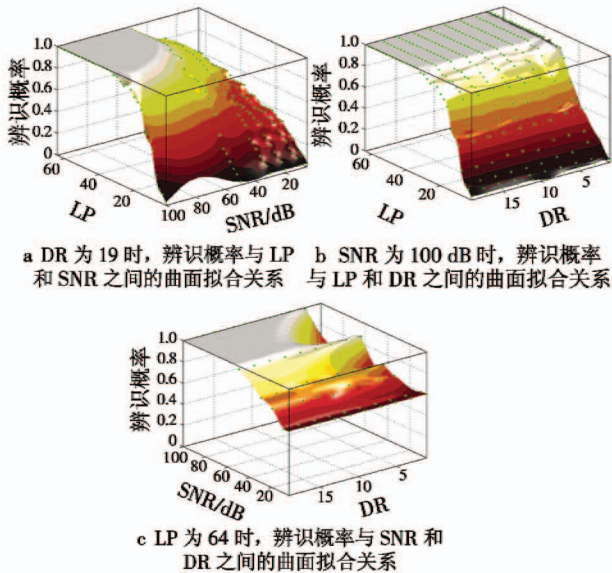


图 10 辨识概率与 LP, SNR 及 DR 之间的曲面拟合关系

Fig. 10 Surface mapping relationship of identification probability with LP, SNR and DR

4.3 试验结论

从探测概率与 SNR 和 LP 之间的关系曲面可以看出, 当 LP 大于等于 8 且 SNR 大于等于 5 dB 时, 探测概率即可进入区间 $[0.5, 1]$, 也就是说 LP 为 8 且 SNR 为 5 dB 可作为 Johnson 准则下的临界点。

从识别概率与 SNR 和 LP 及 DR 之间的关系曲面

可以看出, 当 DR 固定时, 识别概率关于 LP 和 SNR 之间的变化关系反映了如下的现象: LP 的影响大于 SNR 的影响, 当 LP 越大时, 识别概率越高。DR 越大时, 识别概率越高; 当 SNR 固定时, 识别概率关于 LP 和 DR 之间的变化关系反映了如下的现象: LP 和 DR 对识别概率的影响在趋势上是一致的, 两者越大, 识别概率越高, SNR 越大, 识别概率越高。当 LP 固定时, SNR 的影响大于 DR 的影响, 在 SNR 越过某个门槛值时, LP 的增大对识别概率的提高不再产生贡献。

在每一组因素下, 辨识概率总体上均低于识别概率, 但各因素对辨识概率的影响在趋势上类似于对识别概率的影响。

为了能在实际工程中给出一些实现建议, 列出了当识别概率与辨识概率为指定的特殊值时, 各因素所需要满足的最小取值, 如表 2 所示。

表 2 不同识别与辨识概率节点下的自变量最小取值列表
Table 2 The minimum value of the independent variables under different identification and identification probability nodes

	$D_{R, \min}$	$R_{S, N, \min}$	$L_{P, \min}$
识别 概率	50%	1	9
	70%	1	13
	90%	4	20
	95%	5	22
辨识 概率	50%	1	12
	70%	2	16
	90%	5	22
	95%	6	25

从上述分析可以看出, Johnson 准则在实际应用中可以有更广泛的范围, 但是其具体规律的量化仍需要针对特定的应用背景来确定。

5 总结

本文的内容涉及: 1) 距离图像及强度图像仿真, 这个阶段所得到的数据将参与后续的准则构建过程; 2) 讨论了 3 种针对特定任务所开发的目标识别与辨识算法; 3) 在模型数据集上基于前述的识别与辨识算法, 系统地构建出了准则在全空间(观察视角、线对数、信噪比及距离分辨率的正交化空间)上的准确表达形式; 4) 给出了具有工程参考价值的多维可分辨准则结论。

参考文献

- [1] 周立伟. 目标探测与识别 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
- [2] 张天序. 成像自动目标识别 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2005.

(下转第 86 页)

- 非, 龚健, 文亮, 等译. 北京: 中国宇航出版社, 2009.
- [2] PHILIPPE A, GREG A. Assessing and mitigation radiation effects in Xilinx FPGAs [R]. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2008.
- [3] 齐鑫, 冯文全. 基于动态重配置的 SEU 故障检测与修复系统的设计 [C]//中国通信学会第六届学术年会, 2009:82-87.
- [4] LEVEUGLE R, ANTONI L, FEHER B. Dependability analysis: a new application for run-time reconfiguration [C]//Proceedings of the International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS), 2003:345-351.
- [5] JOHNSON E, CAFFREY M P, GRAHAM P S, et al. Accelerator validation of an FPGA SEU simulator [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(6):2147-2157.
- [6] MORGAN K S, MCMURTREY D L, PRATT S H, et al. A comparison of TMR with alternative fault-tolerant design techniques for FPGAs [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007, 54(6):2065-2072.
- [7] CIESLEWSKI G G, GEORGE A D, JACOBS A. Acceleration of FPGA fault injection through multi-bit testing [C]//International Conference on Engineering of Reconfiguration Systems and Algorithms, 2010:1-7.
- [8] VELAZCO R, FOUCARD G, PERONNARD P. Combining results of accelerated radiation tests and fault injection to predict the error rate of an application implemented in SRAM-based FPGAs [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(6):3500-3505.
- [9] Xilinx Corp. Virtex II platform FPGA user guider [Z]. http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds031.pdf, 2007-11-5/2010-11-8.
- [10] Xilinx Corp. Correcting single-event upsets in virtex II platform FPGA configuration memory [Z]. http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/xapp779.pdf, 2007-11-19.
- [11] UPEGUI A, SANCHEZ E. Evolving hardware by dynamically reconfiguring Xilinx FPGAs [J]. Evolvable Systems: Form Biology to Hardware, LNCS, 2005, 3637:56-65.
- [12] 邱金娟, 徐宏杰, 朱明达. SRAM 型 FPGA 单粒子翻转测试及加固技术研究 [J]. 电光与控制, 2011, 18(8):84-88.
- [13] 宋凝芳, 朱明达, 潘雄. SRAM 型 FPGA 单粒子效应试验研究 [J]. 宇航学报, 2012, 33(6):836-842.
- [14] 朱明达, 宋凝芳, 潘雄, 等. 太空单粒子效应光纤陀螺输出地面模拟分析 [J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(1):120-124.
- [15] 潘雄, 张家铭, 朱明达, 等. 基于可编程互联点的 FPGA 布线故障注入方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(1):131-135.
- [16] 张硕, 伊小素, 朱明达, 等. SRAM 型 FPGA 抗多位翻转布线算法 [J]. 实验技术与管理, 2013, 30(7):24-32.
- [17] 宋凝芳, 秦姣梅, 潘雄, 等. SRAM 型 FPGA 单粒子效应逐位翻转故障注入方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(10):1285-1289.
- [18] 伊小素, 邓燕, 潘雄, 等. 表决器对分层三模冗余系统可靠性影响分析 [J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(4):494-498.
- [19] ALDERIGHI M, ANGELO S, MANCINI M, et al. A fault injection tool for SRAM-based FPGAs [C]//Proceedings of 9th IEEE International on-Line Testing Symposium, 2003:129-133.

(上接第 80 页)

- [3] 张天序, 王岳环, 钟胜. 飞行器光学寻的制导信息处理技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [4] DUDZIK M C. The infrared & electro-optical systems handbook volume 4: electro-optical systems design, analysis, and testing [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [5] MICHAEL S. Model 3D [DB/OL]. (2005-09-19) [2016-08-29]. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/file-exchange/7940-model3d>, 2005.
- [6] FOX C S. The infrared & electro-optical systems handbook Volume 6: active electro-optical systems [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993.



请扫描二维码关注我刊