

10-30-2023

Reliability Evaluation Method of Radar Simulation Model Based on Air Combat Mechanism

Chenguang Wang

Shenyang Aircraft Design and Research Institute, AVIC, Shenyang 110035, China, w1c1guang@163.com

Jinpeng Bai

Shenyang Aircraft Design and Research Institute, AVIC, Shenyang 110035, China

Tingting Li

Shenyang Aircraft Design and Research Institute, AVIC, Shenyang 110035, China

Lifeng Miao

Leihua Electronic Technology Research Institute, AVIC, Wuxi 214063, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Reliability Evaluation Method of Radar Simulation Model Based on Air Combat Mechanism

Abstract

Abstract: In modern air combat simulation, the reliability of radar simulation model is very important. Based on simulation model VV&A theory, a cropped and suitable for engineering applications simulation model reliability evaluation method is proposed. Based on the analysis of radar use mechanism in medium and long range air combat and short range air combat is analyzed,, the requirement of radar model in air combat simulation system, the evaluation index system is established, and the reliability quantification method based on JS dispersion is proposed, which further enriches the base of basic method. The test case is designed, the simulation test and the reliability evaluation are carried out. The evaluation result is consistent with the subjective expectation, and the validity of the evaluation method is verified.

Keywords

VV&A, air combat mechanism, radar simulation, indicator system, JS dispersion, reliability evaluation

Authors

Chenguang Wang, Jinpeng Bai, Tingting Li, Lifeng Miao, and Kaifeng Wang

Recommended Citation

Wang Chenguang, Bai Jinpeng, Li Tingting, et al. Reliability Evaluation Method of Radar Simulation Model Based on Air Combat Mechanism[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(10): 2113-2121.

基于空战机理的雷达仿真模型可信度评估方法

王晨光¹, 白金鹏¹, 李婷琰¹, 缪礼锋², 王凯锋¹

(1. 中国航空工业集团公司 沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035; 2. 中国航空工业集团公司 雷华电子技术研究所, 江苏 无锡 214063)

摘要: 在现代空战仿真中, 雷达仿真模型的可信度至关重要。基于仿真模型校核、验证与确认(VV&A)理论, 设计了一套经过裁剪的更适合工程应用的仿真模型可信度评估方法。分析了中远距空战和近距空战中的雷达使用机理, 分析空战仿真系统对雷达模型的需求, 建立了评估指标体系, 提出了基于JS散度的可信度量化评估方法, 进一步丰富了基本方法库。设计了测试用例, 完成了仿真测试和可信度评估, 评估结果与主观预期相符, 验证了该方法的有效性。

关键词: VV&A; 空战机理; 雷达仿真; 指标体系; JS散度; 可信度评估

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2023)10-2113-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-FZ0854

引用格式: 王晨光, 白金鹏, 李婷琰, 等. 基于空战机理的雷达仿真模型可信度评估方法[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(10): 2113-2121.

Reference format: Wang Chenguang, Bai Jinpeng, Li Tingting, et al. Reliability Evaluation Method of Radar Simulation Model Based on Air Combat Mechanism[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(10): 2113-2121.

Reliability Evaluation Method of Radar Simulation Model Based on Air Combat Mechanism

Wang Chenguang¹, Bai Jinpeng¹, Li Tingting¹, Miao Lifeng², Wang Kaifeng¹

(1. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, AVIC, Shenyang 110035, China;

2. Leihua Electronic Technology Research Institute, AVIC, Wuxi 214063, China)

Abstract: In modern air combat simulation, the reliability of radar simulation model is very important. Based on simulation model VV&A theory, a *cropped and suitable for engineering applications simulation model reliability evaluation method is proposed*. Based on the analysis of radar use mechanism in medium and long range air combat and short range air combat is analyzed, the requirement of radar model in air combat simulation system, the evaluation index system is established, and the reliability quantification method based on JS dispersion is proposed, which further enriches the base of basic method. The test case is designed, the simulation test and the reliability evaluation are carried out. The evaluation result is consistent with the subjective expectation, and the validity of the evaluation method is verified.

Keywords: VV&A; air combat mechanism; radar simulation; indicator system; JS dispersion; reliability evaluation

0 引言

随着未来战争向体系化、智能化、多域化方向发展, 仿真作为一种重要手段, 已越来越多地应用于装备论证、工程研制、试验鉴定等工程实

践中。

仿真模型的可信度是考量模型是否足够真实的一个重要指标, 其定义是使用者对应用仿真模型在一定环境、一定条件下得到仿真结果并解决所定义问题正确性的信心程度^[1]。

收稿日期: 2023-07-06

修回日期: 2023-08-27

第一作者: 王晨光(1991-), 男, 工程师, 硕士生, 研究方向为作战仿真与效能评估。E-mail: w1c1guang@163.com

国外在理论研究、方法与技术、标准规范方面做了大量工作。理论研究方面,自 20 世纪 60 年代起,仿真可信度评估的理论从最初单纯的误差校核,到模型校核和模型验证 2 个部分的二元论^[2]。Balci 进一步指出, VV&A 应贯穿于建模与仿真的全生命周期中,包括论域、形式化问题等在内的 10 个阶段的 VV&A 过程^[3]。方法与技术方面, Balci 在前人研究的基础上,归纳总结了 77 种基于传统统计理论的模型校核验证方法和 38 种面向对象的校核验证方法^[4]。标准规范方面,美国国防部于 1996 年开始了 VV&A 规范的起草工作^[5]。经过二十余年的发展,美国各军种已经基于 VV&A 理论制定了 AR5-11、DM Pam 5-11、AFI 16-1001、MDA Core Model VV&A 等一系列标准规范^[6]。

国内关于仿真模型可信度的研究主要基于 VV&A 理论进行一些概念过程的研究^[7],并基于概念过程结合具体应用进行了一些探索,如导弹发射车模型^[8]、舰炮火控模型^[9]等的 VV&A,但理论体系较为薄弱,应用案例深度有限,没能给出较为全面的量化可信度评估结论。在雷达可信度分析方面,文献[10]给出了面向雷达制导半实物仿真系统的可信度分析的原则性阐述;文献[11]给出了对雷达质量评估结果的可信度分析方法。但目前国内对雷达模型进行可信度评估的研究相对较少,没有相对完整的工程案例。

本文基于 VV&A 理论,根据工程实际对 IEEE 发布的 VV&A 一般性过程进行适应性裁剪,设计了一套更适用于工程的仿真模型可信度评估流程,并以战斗机机载雷达模型仿真可信度评估为例,从空战机理牵引评估需求,给出了一套较为完整的可信度评估案例,较为全面地验证了模型可信度评估方法的可行性。

1 仿真模型可信度评估方法

在高保真空战对抗仿真系统中,模型的开发

过程是需求分析→模型方案→概念模型→逻辑/数学模型→仿真程序/系统。而交付的模型通常为最终产品,并不交付可独立运行的概念模型和数学模型,所交付的模型对于校核验证人员来说相当于一个黑箱,无法进行模型代码校核。故本评估方法中主要考虑验证的部分,评估流程如图 1 所示。

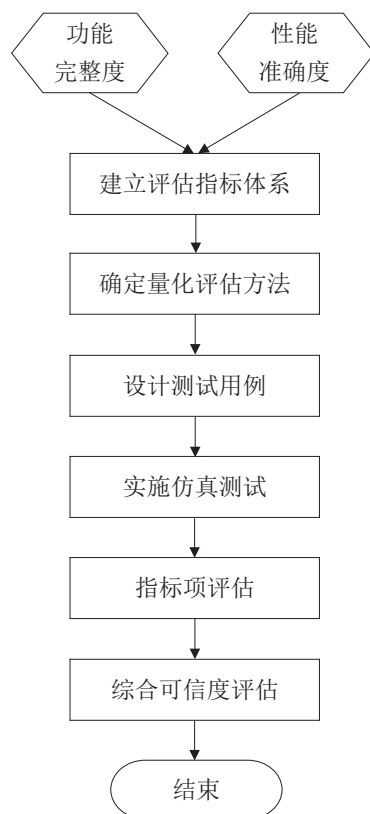


图 1 模型可信度评估流程

Fig. 1 Process of model credibility assessment

(1) 建立评估指标体系

主要从功能完整度、性能准确度两大类指标入手构建仿真模型的指标体系。

功能完整度关注模型是否具备完成高保真空战对抗模拟所需要的功能。性能准确度关注模型表征出的关键性能特征是否与实际一致,如飞行速度、转弯过载、雷达探测距离等,对这些指标进行评估时需要将仿真数据与试飞、试验、信号级仿真等真实度较高的数据进行对比计算,方能给出性能模型的可信度。

(2) 确定量化评估方法

根据各指标项的特点, 逐一选择合适的将仿真数据与实测数据进行一致性量化计算评估的方法。

(3) 设计测试用例

根据可信度评估指标体系梳理测试项, 并针对每个测试项考虑与之相关的影响因素, 以各影响因素的不同选择, 组成不同测试剖面, 形成测试用例。

(4) 实施仿真测试

根据测试用例, 配置相应的测试场景, 驱动模型运行, 记录仿真运行结果和数据。

(5) 指标项评估

按照指标评估体系, 按照既定评估方法基于模型测试运行结果逐条量化评估。指标项评估结果的取值范围为 $[0, 1]$, 0代表仿真模型完全不可信, 1代表仿真模型与真实系统完全一致。

(6) 综合可信度评估

综合可信度评估即对指标体系中的每个子项分配权重, 并将各子项可信度评估结果加权评估, 得到模型综合可信度评估结果。

根据VV&A理论中的相对性原则, 量化评估的结果并不能完全代表完全意义上的优劣, 因此, 考虑根据量化结果按表1所示给出评定等级。

量化可信度	评定等级
$0.9 \leq \alpha < 1.0$	优
$0.7 \leq \alpha < 0.9$	良
$0.6 \leq \alpha < 0.7$	中
$\alpha < 0.6$	差

2 空战中的雷达使用机理简述

2.1 机载雷达功能概述

随着战斗机、传感器、武器的不断发展, 现代空战的主流作战样式已完成由视距范围内“机动为王”的OODA向超视距范围“信息为王”的

OODA的转变^[12], 机载雷达已经成为现代空战场景中重要的目标信息来源。本文面向的是空战场景中的雷达模型, 故只关心空空作战方面的能力。

空战过程中, 根据敌我距离的远近, 通常将空战任务分为中远距空战和近距空战, 下面分别简要分析其中的雷达使用机理。

2.2 中远距空战中的雷达使用机理简述

当敌我双方战机由远逐渐接近时, 雷达可选择边搜索边测距(RWS)模式, 天线指向按波位自动递增, 飞行员可手动调整重频、距离量程、方位扫描范围和俯仰扫描范围等。

当雷达发现目标, 并识别为敌机后, 雷达进入跟踪加搜索(TAS)模式, 天线指向按波位进行自行递进, 同时会对已经形成的目标航迹定时地发起回照, 从而建立起对该目标的稳定跟踪, 形成稳定航迹。

当飞行员在TAS模式下手动选择目标后, 雷达可进入单目标跟踪(STT)模式, 锁定并截获该目标, 飞行员可以进行单目标攻击。导弹发射后, 雷达继续停留在STT模式, 为导弹提供制导。当导弹完成攻击或雷达丢失目标后, 雷达回到RWS模式。三种模式的转换关系如图2所示。

2.3 近距空战中的雷达使用机理简述

空战进入近距格斗阶段时, 雷达需切换进入空战格斗模式(ACM), 可选择平显搜索(ACM-HUD)、垂直搜索(ACM-VT)等近距扫描子模式实现对近距目标的快速检测和跟踪。

格斗状态下截获目标后, 雷达进入单目标瞄准模式(ACM-BORE), 保持对被截获目标的全方位、全高度跟踪, 从而引导近距弹的攻击。

2.4 空战仿真系统中的雷达模型需求分析

综上所述, 空战仿真系统中对雷达模型的需求主要聚焦在雷达工作模式, 天线扫描方位俯仰、天线扫描范围、量程控制等操作指令, 以及跟踪、测距、测速、测角等探测性能方面。

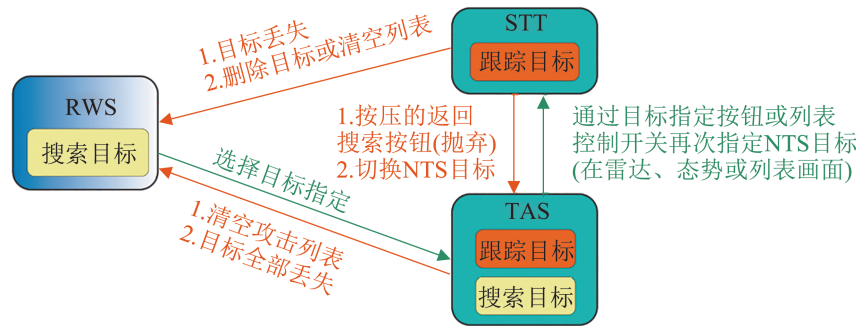


图 2 雷达 RWS-TAS-STT 模式转换示意图
Fig. 2 Radar mode transition of RWS-TAS-STT

3 雷达模型可信度评估实例

3.1 建立评估指标体系

在高保真空战对抗仿真系统中，雷达模型必须在工作模式、操作指令、探测跟踪性能三方面做到保证与实装雷达有较高的一致性，即可据此建立雷达模型的可信度评估指标体系。受篇幅所限，本文所列指标体系中功能的性能要求仅包括探测与跟踪部分的内容，抗干扰、电子战猝发测距等功能本文不讨论。

3.2 确定量化评估方法

经过几十年的发展完善，众多学者提出了较为丰富实用的仿真模型 VV&A 及可信度评估方法，可分为定性方法、定量方法、综合性方法三大类^[13]。本文在现有方法的基础上，借鉴机器学习中常用于从概率分布角度衡量 2 个变量间距离的 KL 散度和 JS 散度概念，提出了应用四次多项式拟合的基于 JS 散度的可信度计算方法，为现有基本方法库进行了补充。

根据雷达建模特点及评估指标体系，可能用到的方法有 0-1 打分法、相对误差法、均值方差对比法、JS 散度法。

3.2.1 0-1 打分法

0-1 打分法按照是否具备或者是否出现问题，对可信度指标项评估结果赋值 0 或者 1。该方法主

要适用于雷达模型的功能完整度指标。

3.2.2 相对误差法

相对误差法适用于单值类性能仿真的一致性评估，如探测距离精度、最大跟踪目标数等。对于只知道指标值或者只知道某概率分布的均值而不知道方差时，也可使用此法。通用公式为

$$P_{\text{误差率}} = \frac{|N_{\text{参考值}} - N_{\text{仿真值}}|}{N_{\text{参考值}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中： P 为相对误差； N 为被评估指标。

则该性能子项的一致性评估结果为

$$\alpha = 1 - P_{\text{误差率}} \quad (2)$$

3.2.3 均值方差对比法

适用于仿真结果及对比数据符合正态分布时，且均值、方差均已知的静态性能指标的一致性评估，如最远探测距离。若仿真结果的均值和方差为 μ_1 、 σ_1^2 ($\sigma_1^2 \neq 0$)，对比实测数据的均值和方差为 μ_2 、 σ_2^2 ($\sigma_2^2 \neq 0$)，则该静态性能子项的一致性评估结果为

$$\alpha = 1 - \frac{2\sigma_1^2\sigma_2^2}{\sigma_1^4 + \sigma_2^4} \cdot \left| \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2} \right| \quad (3)$$

3.2.4 JS 散度法

JS 散度是 KL 散度的一种变体，二者均可用于描述 2 个概率分布之间的差异，如评估仿真模型与实测结果的探测角域范围之间的差异。如果对于同一个随机变量 X 有 2 个单独的概率分布 $P(x)$ 和 $Q(x)$ ，则 KL 散度定义如下^[14]：

(1) 离散概率分布:

$$D_{KL}(p||q) = \sum_{i=1}^n p(x_i) \text{lb} \left(\frac{p(x_i)}{q(x_i)} \right) \quad (4)$$

(2) 连续概率分布:

$$D_{KL}(p||q) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \text{lb} \frac{p(x)}{q(x)} dx \quad (5)$$

可以看出, 如果 Q 的分布越接近 P , 那么散度值越小。由于对数函数是凸函数, 所以 KL 散度的值为非负数, 当 2 个分布完全相同时, KL 散度值为 0, 故 KL 散度的取值范围是 $[0, +\infty)$ 。以上特点导致 KL 散度用于模型可信度评估时存在一定问题, 首先是不对称性, 即 $D_{KL}(p||q) \neq D_{KL}(q||p)$; 其次, 一旦出现 $p(x_i) \neq 0, q(x_i) = 0$ 的情况, KL 散度值立即变为无穷大。因此, 引入 JS 散度, 定义如下:

$$D_{JS}(p||q) = \frac{1}{2} D_{KL} \left(p || \frac{p+q}{2} \right) + \frac{1}{2} D_{KL} \left(q || \frac{p+q}{2} \right) \quad (6)$$

可见, JS 散度对于概率分布的复杂程度较为敏感, 本文只考虑应用于均匀分布这一最为简单的情况, 即对于两均匀分布 P 和 Q , 假定 P 的分布范围是 $[a, b]$, Q 的分布范围是 $[c, d]$ 。

若二者范围相交, 不妨设 $a < c < b < d$, 则:

$$p(x) = \frac{1}{b-a}, x \in [a, b], q(x) = \frac{1}{d-c}, x \in [c, d], \text{ 令 } c-a=l_1, b-c=l_2, d-b=l_3, \frac{l_1}{l_2}=k_1, \frac{l_3}{l_2}=k_2, \text{ 则有}$$

$$D_{JS}(p||q) = 1 + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{1+k_1} \text{lb} \left(\frac{1+k_2}{2+k_1+k_2} \right) + \frac{1}{1+k_2} \text{lb} \left(\frac{1+k_1}{2+k_1+k_2} \right) \right] \quad (7)$$

若二者互相包含, 不妨设 $a < c < d < b$, 令 $c-a=l_1, d-c=l_2, b-d=l_3, (l_1+l_3)/l_2=k$, 则有

$$D_{JS}(p||q) = 1 + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{1+k} \text{lb} \left(\frac{1}{2+k} \right) + \text{lb} \left(\frac{1+k}{2+k} \right) \right] \quad (8)$$

若二者互相分离, 则有 $D_{JS}(p||q) = 1$ 。

下面考虑取部分典型情况计算其 JS 散度值, 并主观给出各种情况下的可信度作为标准值, 以

多项式拟合的方式建立可信度与 JS 散度之间的映射关系。考虑两均匀分布 P 和 Q , 假定 P 的分布范围是 $[0, 1]$, Q 的分布范围是 $[0, 1+k]$ ($k \geq 0$), 则主观上可以以 $1/(1+k)$ 作为可信度标准值。当 k 分别取 0、0.1、0.5、1.0、2.0、4.0、10.0 时, 根据 (7) 式可求得 JS 散度和根据 $1/(1+k)$ 取得的可信度标准值如表 2 所示。

表 2 典型情况下的 JS 散度及可信度标准值
Table 2 JS Dispersion and standard reliability values in typical cases

k 取值	JS 散度	可信度标准值
0	0	1
0.1	0.474 0	0.909 1
0.5	0.190 9	0.666 7
1.0	0.311 3	0.500 0
2.0	0.459 1	0.333 3
4.0	0.610 0	0.200 0
10.0	0.774 3	0.090 9

使用多项式拟合法对上述 JS 散度和可信度标准值建立映射关系, 当使用超过四次拟合时, 最高次项系数 < 0.1 , 最高次项贡献小且计算复杂, 故采用四次拟合, 得到拟合公式为

$$\alpha = 0.165 D_{JS}^4 - 0.608 4 D_{JS}^3 + 1.435 3 D_{JS}^2 - 1.999 4 D_{JS} + 1 \quad (9)$$

目前式 (9) 为基于平均分布得出的结果, 但经过初步测试, 对于可求得 JS 散度的其他分布情况, 其计算结果仍与主观认知基本相符, 具有一定的扩展应用性, 但尚未经过严谨推理与验证。基于上述方法的适用情况, 为各项评估指标选择合适的量化评估方法, 如表 3 所示。

3.3 设计测试用例

按照表 3 设计的评估指标体系, 逐一设计测试用例, 描述测试方法和可信度分析准则。受篇幅所限, 这里不一一列举, 仅描述 2 个指标的测试用例。

指标 1: 探测性能-最远探测距离-RCS-5 m² 目标迎头探测距离

表 3 雷达模型可信度评估指标体系
Table 3 Indicator system of radar model reliability evaluation

评估指标体系				量化评估方法	
类	一级子项	二级子项	三级子项		
功能完整度	指令控制	开关机	开机功能	0-1 打分法	
			关机功能		
	工作模式设置及响应	量程控制	量程可调		准备模式设置
			工作模式设置		RWS 模式设置
					TAS 模式设置
					STT 模式设置
	工作模式指令响应	工作模式指令响应	RWS 模式功能		
			TAS 模式功能		
			STT 模式功能		
			ACM 模式功能响应		
天线及波束扫描	天线扫描中心设置	天线方位扫描中心设置			
		天线俯仰扫描中心设置			
交互仿真	记忆跟踪	记忆跟踪能力测试			
		测速能力设置	速度门限		
探测性能	半球模式控制	测速范围			
		前半球模式测试			
		后半球模式测试			
		自动模式测试			
性能准确度	最远探测距离	RCS-5 m ² 目标迎头探测距离	均值方差对比法		
		RCS-5 m ² 目标尾后探测距离			
测量及跟踪性能	探测角域	RCS-0.1 m ² 目标迎头探测距离			
		RCS-0.1 m ² 目标尾后探测距离			
		方位角角域	JS 散度法		
		俯仰角角域	JS 散度法		
跟踪能力	探测距离精度	探测距离精度	相对误差法		
		最大跟踪目标数	相对误差法		
		测角精度			

测试用例描述：设置目标 RCS 为 5 m²，敌我初始距离为 300 km，正迎头对飞，高度为 10 km，速度均为 300 m/s。记录雷达探测到目标时的敌我距离，并与实装测试数据进行对比分析。

指标 2：探测性能-探测角域-方位角角域

测试用例描述：设置目标 RCS 为 5 m²，距载机 100 km，在机体轴方位角-90°~90°范围内随机

放置，查看雷达输出情况。测试能探测到目标的方位角域边界，并与实装测试数据进行对比分析。

3.4 实施仿真测试

依托高保真空战对抗仿真系统中的雷达模拟器，按照表 3 所示测试用例进行测试，模型测试工具界面和空战态势设定界面如图 3~4 所示，记录仿真数据和仿真结果。

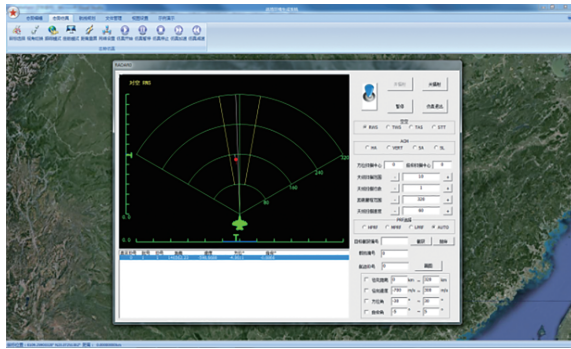


图3 雷达仿真模型测试工具界面
Fig. 3 Interface radar simulation model test tool

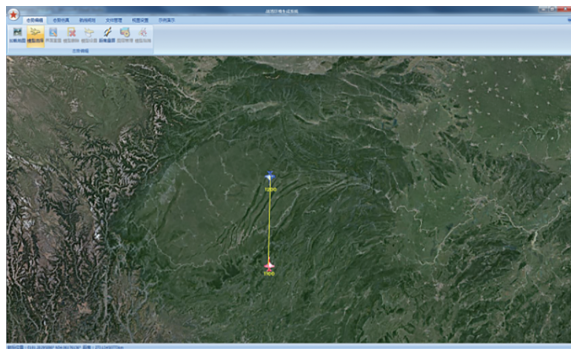


图4 空战态势设定界面
Fig. 4 Interface of air combat situation settings

3.5 指标项评估

3.5.1 功能完整度指标项评估

经过测试, 功能完整度指标项中的各项测试结果均满足各项的可信度分析准则, 按0-1打分法, 评估结果均为1。

3.5.2 性能准确度指标项评估

算例1: “探测性能-最远探测距离-RCS-5 m²目标迎头探测距离”项测试

基于3.4节介绍的雷达仿真模型测试工具20次仿真测量, 探测距离仿真值与该型雷达在实装试飞中的实测值的均值与方差如表4所示, 其原始概率分布基本符合正态分布。

利用均值方差对比法, 求得该项指标的可信度计算结果为

$$\alpha = 1 - \frac{2 \times 15.1 \times 17.2}{15.1^2 + 17.2^2} \times \left| \frac{228.6 - 254.7}{254.7} \right| = 0.8984$$

表4 RCS-5 m²目标迎头探测距离测试结果
Table 4 Test results RCS-5 m² target head-on detection range

	均值 μ	方差 σ^2
仿真值	228.6	15.1
实测值	254.7	17.2

算例2: “探测性能-探测角域-方位角角域”项测试

仿真模型测试的方位角角域范围为[-60°, 60°], 而实测方位角角域范围为[-70°, 70°]。二者属于相包含的情况, 故带入式(8), 则有

$$\begin{cases} l_1 = -60 - (-70) = 10 \\ l_2 = 60 - (-60) = 120 \\ l_3 = 70 - 60 = 10 \end{cases}$$

于是有 $k_1 = (l_1 + l_3)/l_2 = 1/6$

则

$$D_{JS\text{方位角}} = 1 + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{1 + 1/6} \text{lb} \left(\frac{1}{2 + 1/6} \right) + \text{lb} \left(\frac{1 + 1/6}{2 + 1/6} \right) \right] = 0.0754$$

根据式(9)则可求得该项指标的可信度计算结果为: $\alpha = 0.8572$ 。

3.6 综合可信度评估

对于功能完整度指标, 取各项评估的均值即可, 由于各项评估结果均为1, 故功能完整度评估结果为1。

对于性能准确度指标, 本文考虑用层次分析法进行综合评估。层次分析法是一种广泛应用的综合评估方法, 详细原理及步骤可参考文献[15]。

经过测试与计算, 性能准确度指标项中的各项测试结果和评估结果如表5所示。

将性能准确度指标中的三级子项评估结果取均值计算后, 得到最远探测距离、探测角域、探测距离精度测试、跟踪能力测试等4个二级子项的评估值分别为0.8795、0.7948、0.8417、0.9215。

表 5 性能准确度指标评估结果
Table 5 Evaluation result of simulation accuracy indicators

类	评估指标体系			测试结果	评估结果
	一级子项	二级子项	三级子项		
性能准确度	探测性能	最远探测距离	RCS-5 m ² 目标 迎头探测距离	均值方差对比法结果为 10.16%	0.898 4
			RCS-5 m ² 目标 尾后探测距离	均值方差对比法结果为 11.06%	0.889 4
			RCS-0.1 m ² 目标 迎头探测距离	均值方差对比法结果为 9.63%	0.903 7
		RCS-0.1 m ² 目标 尾后探测距离	均值方差对比法结果为 17.34%	0.826 6	
		探测角域	方位角角域	JS 散度计算结果 0.075 4, 四次拟合 可信度为 0.857 2	0.857 2
			俯仰角角域	JS 散度计算结果 0.148 8, 四次拟合 可信度为 0.732 3	0.732 3
	测量及跟踪性能	探测距离精度测试	探测距离精度测试	相对误差为 15.83%	0.841 7
		跟踪能力测试	最大跟踪目标数测试	最大跟踪数量与实装一致	1
			测角精度测试	相对误差为 15.70%	0.843 0

对 4 个二级子项应用层次分析法进行综合计算, 两两比较, 得到判断矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 3 \\ 1/3 & 1 & 3 & 1 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 1 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

则可计算得到 4 个二级子项的权重为 $\omega = [0.520\ 5, 0.201, 0.077\ 6, 0.201\ 0]^T$, 经过一致性验证:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4.043\ 4 - 4}{4 - 1} = 0.014\ 5$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.014\ 5}{0.9} = 0.016\ 1$$

式中: CI 为层次分析法中的一致性指标; λ_{\max} 为判断矩阵 A 的最大特征根; n 为考虑因素数量; RI 为随机一致性指标; CR 为检验系数; 一般认为如果 $CR < 0.1$, 则判断矩阵 A 的一致性可接受。

由于 $CR = 0.016\ 1 < 0.1$, 矩阵的一致性可接受, 权重 ω 可用, 则可得到性能准确度指标的综合可信度为

$$\alpha_{\text{性能准确度}} = 0.520\ 5 \times 0.8795 + 0.201 \times 0.794\ 8 + 0.077\ 6 \times 0.841\ 7 + 0.201 \times 0.921\ 5 = 0.868$$

对功能完整度、性能准确度评估结果再度进行综合量化, 主观分配二者权重分别为 0.35 和 0.65, 可得到综合量化可信度评估结果为

$$\alpha = 0.35 \times 1 + 0.65 \times 0.868 = 0.914\ 2$$

按照表 1 对雷达模型可信度评估结果进行分级, 该雷达模型的可信度等级为“优”。

4 结论

本文基于 VV&A 理论, 结合工程实际, 提出了一套仿真模型可信度评估方法, 并将此方法应用于某雷达仿真模型的可信度评估中, 基于空战机理, 分析了雷达模型需求, 建立了评估指标体系, 提出了基于 JS 散度的可信度量化评估方法, 设计了测试用例, 完成了仿真测试和可信度评估, 且各项量化评估结果与邀请的一线飞行员进行作战体验后的主观评价基本相符, 验证了本套评估方法的有效性。

参考文献:

- [1] 高亚奎, 朱江, 林皓, 等. 飞行仿真技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2015: 413-420.
Gao Yakui, Zhu Jiang, Lin Hao, et al. Flight Simulation

- Technology[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2015: 413-420.
- [2] Fishman G S, Kiviat P J. The Statistics of Discrete-event Simulation[J]. *Simulation*, 1968, 10(4): 185-195.
- [3] Balci O. A Life Cycle for Modeling and Simulation[J]. *Simulation*, 2012, 88(7): 870-883.
- [4] Balci O. Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models[C]//Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference. [S.l.]: [s.n.], 1997: 135-141.
- [5] Department of Defense. Verification Validation and Accreditation (VV&A) Recommended Practice Guide [K]. [S.l.]: [s.n.], 1996.
- [6] 刘晓平, 郑利平, 路强, 等. 仿真VV&A标准和规范研究现状及分析[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(2): 456-460.
Liu Xiaoping, Zheng Liping, Lu Qiang, et al. Overview and Analysis of Research on Standards and Specifications of Simulation VV&A[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(2): 456-460.
- [7] 董智高, 胡斌. 作战实验模型VV&A通用内容研究[J]. *火力与指挥控制*, 2018, 43(2): 71-76.
Dong Zhigao, Hu Bin. Research on VV&A General Content of Operational Experiment Model[J]. *Fire Control & Command Control*, 2018, 43(2): 71-76.
- [8] 张生, 吴艳, 王忠. 发射车建模与仿真的VV&A应用探索[J]. *导弹与航天运载技术*, 2017(1): 75-78, 106.
Zhang Sheng, Wu Yan, Wang Zhong. Prospect of VV&A Application in the Modeling and Simulation of Launch Vehicle[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2017(1): 75-78, 106.
- [9] 韩建兴, 田尚飞. 新型舰炮火控仿真试验建模及VV&A技术[J]. *指挥控制与仿真*, 2015, 37(5): 113-117.
Han Jianxing, Tian Shangfei. Modeling and VV&A of Simulation Test in Advanced NGFCU[J]. *Command Control & Simulation*, 2015, 37(5): 113-117.
- [10] 赵红云. 雷达制导半实物仿真系统可信度分析[J]. *舰船电子工程*, 2015, 35(4): 90-92, 111.
Zhao Hongyun. Analysis on Credibility of Radar Seeker Hardware-in-the-loop Simulation System[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2015, 35(4): 90-92, 111.
- [11] 王涛, 欧阳林涛, 毕增军, 等. 一种雷达质量评估结果可信度分析方法[J]. *空军预警学院学报*, 2015, 29(1): 27-29, 34.
Wang Tao, Ouyang Lintao, Bi Zengjun, et al. Analytic Method for Result Reliability of Radar Quality Assessment[J]. *Journal of Air Force Early Warning Academy*, 2015, 29(1): 27-29, 34.
- [12] 杨伟. 关于未来战斗机发展的若干讨论[J]. *航空学报*, 2020, 41(6): 1-12.
Yang Wei. Development of Future Fighters[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(6): 1-12.
- [13] 杨小军, 徐忠富, 张星, 等. 仿真模型可信度评估研究综述及难点分析[J]. *计算机科学*, 2019, 46(增1): 23-29.
Yang Xiaojun, Xu Zhongfu, Zhang Xing, et al. Overview and Difficulties Analysis on Credibility Assessment of Simulation Models[J]. *Computer Science*, 2019, 46(S1): 23-29.
- [14] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
Zhou Zhihua. *Machine Learning*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
- [15] 张炳江. 层次分析法及其应用案例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 10-16.