

7-20-2021

Evaluation Method on Multi-stage Bayes Information Fusion for Scatters HWIL Simulation

Yecheng Wang

Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;

Ma Jing

Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;

Congjun Jin

Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;

Jie Li

Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, 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.

Evaluation Method on Multi-stage Bayes Information Fusion for Scatters HWIL Simulation

Abstract

Abstract: In order to simulate the complex 3D target in the RF HWIL (hardware in the loop simulation) system, *the equivalence framework of multiple scattering centers of complex 3D target for three stages of outfield test data, mathematics simulation data and HWIL data are introduced.* Using the pre-test information as each stage for transmission, *evaluation method is designed by multi-stage Bayes information fusion for HWIL simulation.* Based on prior information of outfield test data and mathematics simulation data, by using Bayes information fusion theory, the average data reconstruction of each stage is obtained and compared and high reliability for HWIL simulation can be achieved.

Keywords

complex target, simulation of multiple scattering centers, Bayes information fusion, evaluation

Authors

Yecheng Wang, Ma Jing, Congjun Jin, Jie Li, and Bin Shi

Recommended Citation

Wang Yecheng, Ma Jing, Jin Congjun, Jie Li, Shi Bin. Evaluation Method on Multi-stage Bayes Information Fusion for Scatters HWIL Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(7): 1682-1688.

多阶段 Bayes 信息融合的多散射中心仿真评估方法

王晔成, 马静, 金从军, 揭力, 石彬

(北京仿真中心 航天系统仿真重点实验室, 北京 100854)

摘要: 为对射频半实物仿真系统中复杂体目标进行仿真, 介绍了复杂体目标多散射中心从外场数据、数学仿真数据、半实物仿真数据三阶段评估等效性框架, 分别利用作为阶段的验前信息进行传递, 设计了基于可信度的多阶段 Bayes 信息融合的多散射中心半实物仿真等效性评估。在基于外场数据和数学仿真数据 2 个阶段的验前信息, 通过信息融合 Bayes 理论, 得到并比较了各阶段数据重构度平均值, 获取可信度更高的半实物仿真等效性评估值。

关键词: 复杂体目标; 多散射中心仿真; Bayes 信息融合; 评估

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 07-1682-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0179

Evaluation Method on Multi-stage Bayes Information Fusion for Scatters HWIL Simulation

Wang Yecheng, Ma Jing, Jin Congjun, Jie Li, Shi Bin

(Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China)

Abstract: In order to simulate the complex 3D target in the RF HWIL (hardware in the loop simulation) system, the equivalence framework of multiple scattering centers of complex 3D target for three stages of outfield test data, mathematics simulation data and HWIL data are introduced. Using the pre-test information as each stage for transmission, evaluation method is designed by multi-stage Bayes information fusion for HWIL simulation. Based on prior information of outfield test data and mathematics simulation data, by using Bayes information fusion theory, the average data reconstruction of each stage is obtained and compared and high reliability for HWIL simulation can be achieved.

Keywords: complex target; simulation of multiple scattering centers; Bayes information fusion; evaluation

引言

随着建模与仿真技术的发展与广泛应用, 仿真模型的功能与性能大大增强, 仿真系统越来越复杂, 仿真模型可信度评估面临着许多新的挑战。2019 年杨小军等系统回顾了国内外仿真模型可信度研究的主要工作, 分析最新研究成果, 并总结了相关概念和方法^[1]。而武器装备受到研制周期和研制经费的制约, 有时系统可信性实验数量很少, 具有典型的小子样复杂系统特点。但武器装备在研制过程中, 由于高新技术的采用, 实验中设备和手段的进步和多样化, 使实验信息具有多种信息源。大量的实验信息产生于进行系统性能评估时。从信息

论的角度看, 通过充分利用信息, 才可对复杂系统的性能有更深刻的认识。文献[2]对末制雷达半实物仿真系统开发各阶段不同模型开展可信度分析; 文献[3]介绍舰炮武器系统半实物仿真的仿真实验结果可信性问题、仿真模型校核、验证与确认(VV&A)的层次、仿真模型评估方法; 赵彬等^[5]研究了某型空空导弹模型的仿真可信度评估方法, 提出了基于最大熵谱估计法的导弹仿真数据一致性验证方法。文献[4]给出了多阶段实验数据融合方法, Bayes 方法是一种充分利用先验信息的实验评估方法, 可大大减少所需实验子样数, 节约实验成本, 提高实验效率。针对小样本条件下系统可靠性评估的特点, 文献[7]提出了一种基于改进

收稿日期: 2020-04-12

修回日期: 2020-11-23

第一作者/通讯作者: 王晔成(1994-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为射频半实物仿真。E-mail: wang271828@sina.cn

Bayes-Bootstrap 的系统可靠性仿真评估方法。

在导弹系统的设计、仿真, 雷达系统的设计、鉴定, 无论是新装备的研制论证中, 还是现役装备战术使用方案的制定等均需要复杂目标(如飞机、舰艇、导弹等)的电磁散射特性。射频半实物仿真系统中对复杂体目标(如飞机、舰艇、导弹等)的仿真是对体目标提取的多散射中心进行模拟, 衡量目标仿真的等效性是评定仿真置信度的关键。

为得到更高的有限实验次数下半实物仿真数据相对真实实验数据的可信度, 本文利用多阶段信息融合的 Bayes 理论, 给出了复杂体目标多散射中心半实物仿真等效性评估多阶段框架, 而后系统阐述了基于可信度的多阶段 Bayes 信息融合半实物仿真等效性评估方法, 在目标模拟过程中, 分阶段利用得到的外场数据、数学仿真数据进行传递, 利用 Bayes 理论进行融合, 对舰船目标多散射中心半实物仿真数据等效性进行评估, 提高了评估水平。

1 复杂体目标多散射中心半实物仿真等效性评估多阶段框架设计

1.1 评估指标

实验过程中会获得各种复杂系统实验信息, 将

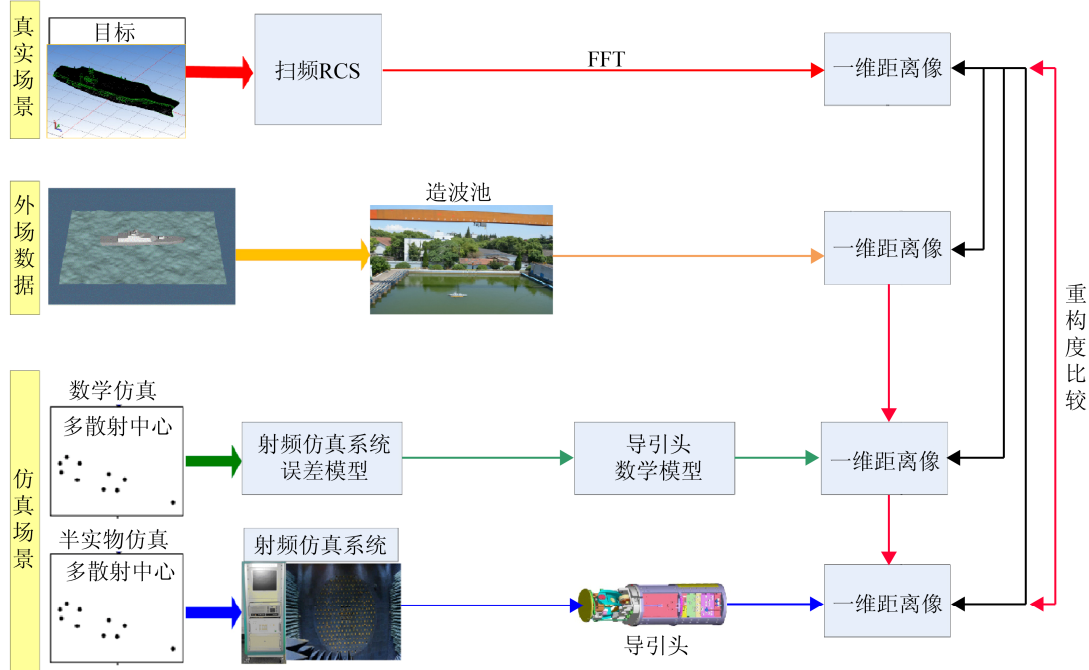


图 1 多散射中心半实物仿真等效性评估多阶段框架

Fig. 1 Multi-stage framework for evaluating the equivalence of multi scattering centers in hardware in loop simulation

目标连续多频点扫频雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)傅里叶变换得到的一维距离像作为理论数据。本文设计的复杂体目标多散射中心仿真等效性评估框架将存在多个阶段数据的精度: ①由缩比模型在造波池中获得的一维距离像可进行外场数据的重构度评价; ②利用数学仿真通过仿真系统误差模型、导引头数据模型获得一维距离像进行数学仿真数据的重构度评价; ③在射频半实物仿真系统中模拟多散射中心由接收装置获取一维距离像进行半实物仿真数据的重构度评价。

本文采用一维距离像的重构度来评价获取数据的精度, 对复杂体目标多散射中心仿真的等效性多阶段评估是利用现有外场数据重构度、数学仿真数据重构度多阶段评估在射频半实物仿真系统中模拟的复杂体目标的等效性。

1.2 评估过程

因此本文利用多阶段信息融合的 Bayes 理论, 融合外场数据、数学仿真数据的先验信息可信度的基础上, 评估半实物仿真数据的等效性。

各阶段重构度计算流程如图 1 所示。

外场数据、数学仿真数据与半实物仿真数据皆以理论数据为真值，分别求出与理论数据的重构度，如图1右侧一维距离像框图黑色箭头指示，其含义为两两进行比较，得到的重构度值，然后进行阶段性评估。

图2所示为传递融合过程，一维距离像框图纵向红色箭头为分阶段信息融合的工作，即为将各信息利用并传递融合得到的重构度，与半实物仿真数据与理论数据相较得到的重构度进行比较，来说明获取了可信度更高的半实物仿真等效性评估值。

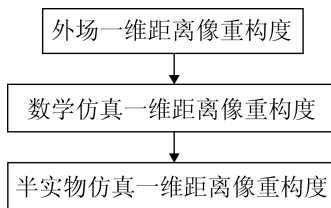


图2 多阶段实验数据融合
Fig. 2 Multi stage experimental data fusion

2 多阶段信息融合的 Bayes 理论

实验过程中可以获得各种复杂系统实验信息，由于作为验前信息的实验信息获取方法不一样，与理论信息存在一致性和可信度问题。利用多阶段实验数据融合方法，将各种实验数据进行阶段分类，即将第1阶段的实验数据作为最初的先验信息，当获取第2阶段的数据后，按照 Bayes 方法进行信息融合得到后验信息，并将其作为下一阶段的先验信息，依次递推，进行多阶段的信息融合。设复杂系统在研制过程中获得了 m 阶段的先验实验数据信息：

$$x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots, x_{n_i}^{(i)}, i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

有 n 个现场子样 x_1, x_2, \dots, x_n ，并假定仿真实验和现场子样都服从同一分布 $f(x|\theta)$ ，并且都是独立同分布样本。

根据多阶段实验数据融合的思想。

(1) 第1阶段仿真数据将外场数据 $X^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_{n_1}^{(1)})$ 作为第2阶段数学仿真数据 $X^{(2)} = (x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, \dots, x_{n_2}^{(2)})$ 的先验信息。这样，通过

第1阶段外场仿真数据就可获得第2阶段数学仿真数据的先验分布 $\pi_1(\theta)$ 。

(2) 再结合第2阶段数学仿真数据，就可以获得第2阶段的后验分布，记 $\pi_2(\theta|X^{(2)})$ ，具体如式(2)所示：

$$\pi_2(\theta|X^{(2)}) \propto \prod_{i=1}^{n_2} f(x_i^{(2)}|\theta)\pi_1(\theta) \quad (2)$$

(3) 把 $\pi_2(\theta|X^{(2)})$ 作为下一阶段评估半实物仿真数据 $X^{(3)} = (x_1^{(3)}, x_2^{(3)}, \dots, x_{n_3}^{(3)})$ 的先验分布，即得到下一阶段的后验分布，记 $\pi_3(\theta|X^{(3)})$ ，如式(3)所示：

$$\pi_3(\theta|X^{(3)}) \propto \prod_{i=1}^{n_3} f(x_i^{(3)}|\theta)\pi_2(\theta|X^{(2)}) \quad (3)$$

以此类推，就可获得第 m 阶段的后验分布，记 $\pi_m(\theta|X^{(m)})$ ，具体如图3所示。

3 基于可信度的多阶段 Bayes 信息融合半实物仿真等效性评估方法

定义式(4)作为重构度指标来评价散射中心复现重构度，即为能量归一化的信号互相关函数。

$$\gamma = \frac{\sum_x M(x)S(x)}{\sqrt{\sum_x M^2(x)}\sqrt{\sum_x S^2(x)}} \quad (4)$$

式中： $M(x)$ 为从多散射中心模型计算得到的理论距离像信号； $S(x)$ 为各阶段数学仿真、外场测试与半实物仿真时得到的距离像信号。

3.1 第一阶段外场数据信息融合

由随机过程理论，设一维距离像的重构度 r 服从瑞利分布，其概率密度函数为

$$f(r) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma^2} r e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, & r \geq 0 \\ 0, & r < 0 \end{cases} \quad (5)$$

记 σ^2 为 D ，设样本方差 D 为逆 Gamma 密度函数 $g(D; \alpha_0, \beta_0)$

$$g(D; \alpha_0, \beta_0) = \frac{\alpha_0^{\beta_0}}{\Gamma(\beta_0)} D^{-(\beta_0+1)} e^{-\frac{\alpha_0}{D}} \quad (6)$$

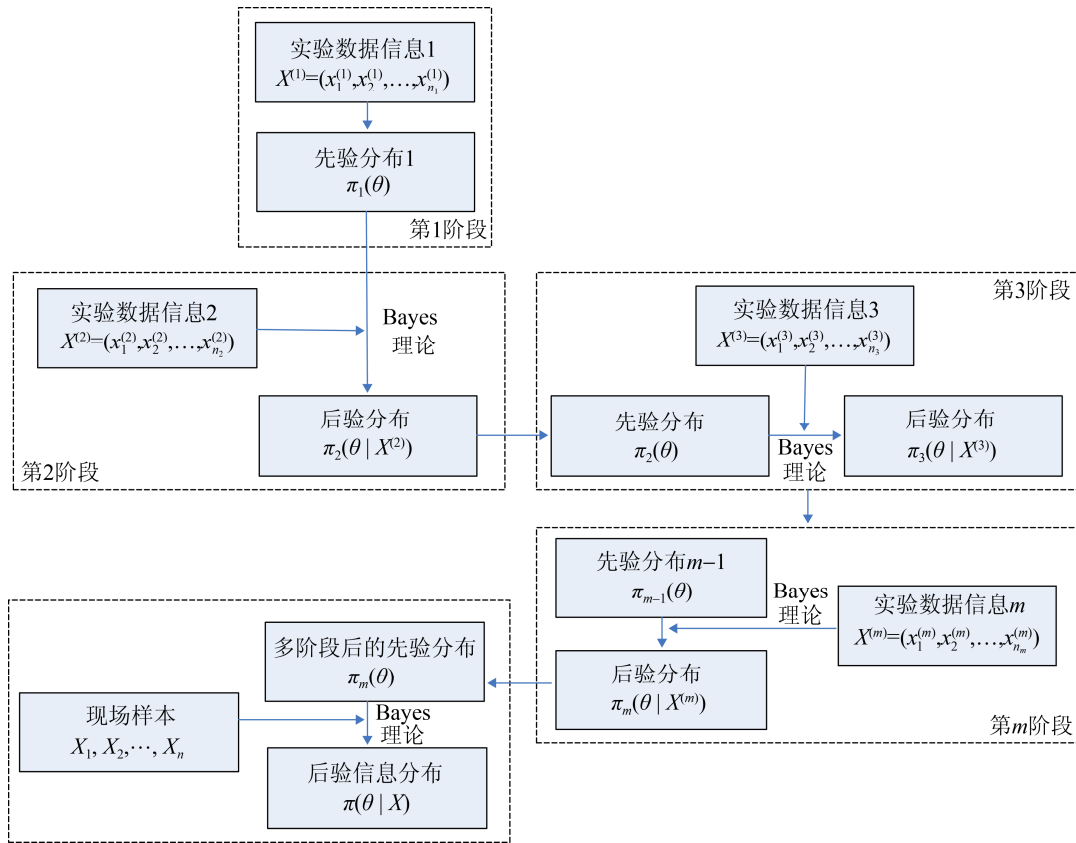


图 3 基于多阶段实验数据融合的 Bayes 原理图
Fig. 3 Bayes schematic diagram based on multi-stage experimental data fusion

验前的外场密度函数参数 α_0, β_0 可以由外场数据计算近似确定。如对舰船的缩比模型在造波池中做了 n_0 个角度的测试, 可得 n_0 个重构度数据 r_0 , 于是可取

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_0} (r_{0i})^2, \beta_0 = n_0 \quad (7)$$

式中: $\alpha_0, \beta_0, r_0, n_0$ 为第一阶段外场数据的评估参数。

假定由仿真可信度评估给出可信度 $\varepsilon (0 \leq \varepsilon \leq 1)$, (ε 表示第一阶段外场数据相对第二阶段数学仿真数据的可信度), 由先验信息获取先验分布密度函数为 $\pi(\theta)$, 获取现场试验数据计算验后分布密度函数时, 定义可信性 Bayes 模型。

$$\pi_\varepsilon(\theta | x) = \frac{p(x | \theta) \pi^\varepsilon(\theta)}{\int_{\Theta} p(x | \theta) \pi^\varepsilon(\theta) d\theta} \quad (8)$$

这样就把仿真可信度融入到了验后分布密度函数的计算中, 基于 $\pi_\varepsilon(\theta | x)$ 的 Bayes 分析称之为

可信性 Bayes 分析。

样本的释然函数为

$$P(r | D) = \frac{1}{D^n} \left(\prod_{i=1}^n r_i \right) e^{-\frac{1}{2D} \sum_{i=1}^n r_i^2} \quad (9)$$

后验分布:

$$\begin{aligned} \pi_\varepsilon(D | r) &\propto P(r | D) \pi^\varepsilon(D) = P(r_0 | D) (g(D; \alpha_0, \beta_0))^\varepsilon = \\ &= \frac{1}{D^{n_0}} \left(\prod_{i=1}^{n_0} r_{0i} \right) e^{-\frac{1}{2D} \sum_{i=1}^{n_0} r_{0i}^2} \left(\frac{\alpha_0 \beta_0}{\Gamma(\beta_0)} D^{-(\beta_0+1)} e^{-\frac{\alpha_0}{D}} \right)^\varepsilon \\ &\propto D^{-((\varepsilon\beta_0+n_0+\varepsilon-1)+1)} e^{-\frac{1}{D} (\varepsilon\alpha_0 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_0} r_{0i}^2)} \end{aligned} \quad (10)$$

3.2 第二阶段数学仿真数据信息融合

由于逆 Gamma 分布为共轭分布, 故第二阶段数学仿真数据的验后分布为:

$$\begin{aligned} \pi(D | r_1) &= g(D; \alpha_1, \beta_1) \\ \alpha_1 &= \varepsilon\alpha_0 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_1} r_{1i}, \beta_1 = \varepsilon\beta_0 + n_1 + \varepsilon - 1 \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $\alpha_1, \beta_1, r_1, n_1, \varepsilon$ 为第二阶段数学仿真数据的

参数(每阶段的 α , β , r , n 含义类似); ε 为第一阶段外场数据相对第二阶段数学仿真数据的可信度。

3.3 第三阶段半实物仿真数据信息融合

同理,把第二阶段数学仿真数据的验后分布作为第三阶段半实物仿真数据的验前信息,可求得第三阶段的验后分布:

$$\pi(D|r_2) = g(D; \alpha_2, \beta_2) \quad (12)$$

$$\alpha_2 = \varepsilon' \alpha_1 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_2} r_{2i}, \beta_2 = \varepsilon' \beta_1 + n_2 + \varepsilon' - 1$$

式中: α_2 , β_2 , r_2 , n_2 , ε' 为第三阶段半实物仿真的参数; ε' 为第二阶段数学仿真数据相对第三阶段半实物仿真数据的可信度。

此时可得到对第三阶段 D 的 Bayes 估计, D 的均值为

$$\hat{D} = \alpha_2 / (\beta_2 - 1) \quad (13)$$

4 舰船目标多散射中心半实物仿真等效性评估算例

4.1 正交实验设计半实物仿真等效性评估

正交实验设计法是研究多因素多水平的一种设计方法,它是根据正交性从全面实验中挑选部分有代表性的点进行实验。正交实验设计法是目前最常用的实验设计分析方法,以实际经验、数理统计和概率论为基础。实验方案由标准化正交表安排。对复杂体目标的仿真等效性也存在如何从众多目标入射角度范围内设计具有代表性的点进行实验。这些代表性的点具有“均匀分散,齐整可比”的特点。

通常的正交试验设计是“点状设计”,根据半实物仿真的特点具有一定的局部遍历性,即小范围有限次实验,本文将改进正交实验设计从“点状设计”到“面状设计”,利用正交实验设计设置实验取值顶点,按此顶点外扩一个长方形区域进行实验。

选取代表性的点,以入射角俯仰(5个点,取值为 0° , 20° , 40° , 60° , 80°)、方位(5个点,取值为 0° , 80° , 160° , 240° , 345°)作为实验因子利用正

交实验设计方法设计实验取值顶点,设计有 5×5 共 25 个顶点,再取以这 25 个顶点在长方形范围内进行半实物仿真实验,采集一维距离像。

4.2 三阶段一维距离像

本文通过接收、处理生产一维距离像来评估复杂体目标的仿真等效性(用重构度来描述),图 4~6 是俯仰角为 20° 、方位角为 90° 时舰船一维距离像的外场数据、数学仿真数据和半实物仿真数据,外场数据的重构度为 0.826,数学仿真数据的重构度是 0.923,半实物仿真数据的重构度是 0.894。

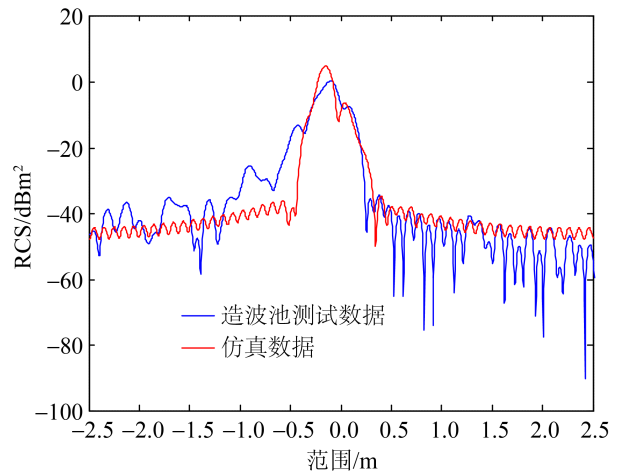


图4 理论一维距离像与外场一维距离像

Fig. 4 Theoretical one-dimensional range profile and field one-dimensional range profile

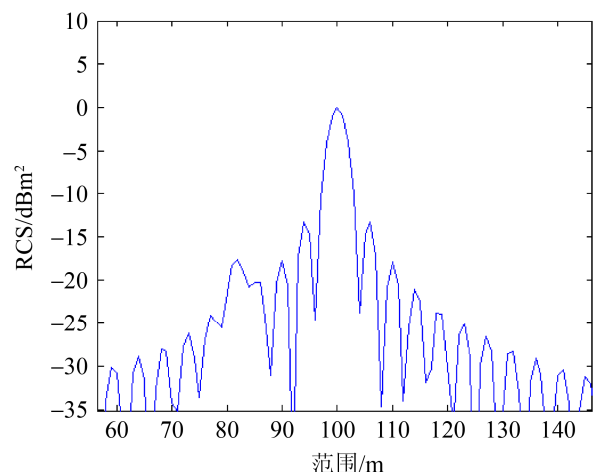


图5 数学仿真一维距离像

Fig. 5 Mathematical simulation of one dimensional range profile

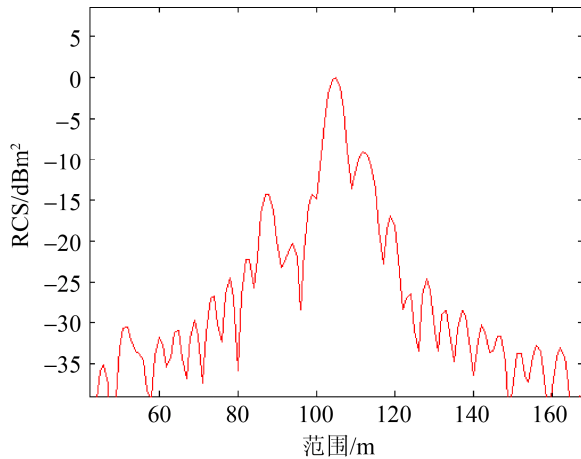


图 6 半实物仿真一维距离像

Fig. 6 One dimensional range profile of hardware in loop simulation

由图 4 可见, 造波池测试数据与仿真数据基本一致, 对比图 5 与图 6 数学仿真一维距离像与半实物仿真一维距离像基本一致。外场数据重构度值小于半实物仿真数据重构度小于数学仿真数据重构度, 仿真模型本质上是对现实的近似抽象, 可见从纯数学模型仿真到实物测试过程中, 实际非理想情况引入, 重构度下降。

4.3 三阶段 Bayes 信息融合评估实验

在外场造波池中采集舰船缩比模型的一维距离像并计算重构度, 利用式(4), 比较理论一维距离像曲线与外场一维距离像曲线, 由于外场测试条件受限, 实验样本数少, 计算如表 1 所示。

表 1 外场数据重构度

Tab. 1 Field data reconstruction

角度/(°)	重构度
(20, 60)	0.908 6
(20, 90)	0.852 6
(20, 225)	0.728 0

数学仿真可获取大范围角度的一维距离像, 本文采取按照将俯仰角每 10°, 360°方位角平均的方式统计数学仿真数据重构度。类似地将数学仿真一维距离像与理论一维距离像比较, 如表 2 所示。

半实物仿真按照正交实验设计方法来采集一维距离像, 类似地获取重构度如表 3 所示。

表 2 数学仿真数据重构度

Tab. 2 Reconstruction of mathematical simulation data

俯仰角/(°)	重构度
10~20	0.977 0
20~30	0.973 1
30~40	0.962 1
40~50	0.951 4
50~60	0.943 2
60~70	0.933 8
70~80	0.928 9

表 3 半实物仿真数据重构度

Tab. 3 Reconstruction of hardware in the loop simulation data

长方形顶点	重构度	长方形顶点	重构度
(0, 0)	0.923	(20, 0)	0.914
(0, 80)	0.924	(20, 80)	0.920
(0, 160)	0.928	(20, 160)	0.918
(0, 240)	0.924	(20, 240)	0.918
(0, 345)	0.978	(20, 345)	0.921
(40, 0)	0.905	(60, 0)	0.901
(40, 80)	0.918	(60, 80)	0.899
(40, 160)	0.911	(60, 160)	0.897
(40, 240)	0.904	(60, 240)	0.896
(40, 345)	0.907	(60, 345)	0.884
(80, 0)	0.879		
(80, 80)	0.885		
(80, 160)	0.896		
(80, 240)	0.875		
(80, 345)	0.874		

由表 1~3 可见, 同一俯仰角时, 数学仿真数据重构度仍最大, 外场测试数据重构度最低, 与前述规律一致。同时随着俯仰角从 0°向 80°增大, 重构度皆逐渐变小, 这与照射方向逐渐偏离复杂体目标导致信号电平降低, 从而影响一维距离像有关。按照基于可信度的多阶段 Bayes 信息融合半实物仿真等效性评估方法, 平均值为 0.927 3。按照数据统计求算数平均, 第一阶段的外场数据平均值为 0.829 7 (参考表 1), 第二阶段的数学仿真 M 数据平均值为 0.952 8(表 2), 第三阶段的半实物仿真数据平均值为 0.908 5(表 3)。由此可以看出, 在基于前 2 个阶段验前信息基础上, 由多阶段 Bayes 信息融合方法得到的半实物仿真等效性评估值将更具可信度。

5 结论

本文介绍了一种应用在评估复杂体目标多散射中心仿真等效性的 Bayes 融合方法。在基于外场数据和数学仿真数据 2 个阶段的验前信息, 通过信息融合 Bayes 理论, 获取半实物仿真等效性评估值。Bayes 方法充分利用了验前信息, 适用于小子样, 弥补了现场实验信息的不足。该方法对提高武器系统的评估具有十分重要的价值。今后研究方向是一方面不断完善已有的评估方法, 将数学方法与工程化方法结合。另一方面还可探索出更科学方便的仿真系统可信度评估方法, 获取可信度更高的半实物仿真等效性评估值。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 朱绍强, 李相民. 舰炮武器系统仿真试验可信性评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(10): 36-40, 44. Zhu Shaoqiang, Li Xiangmin. Research on Evaluation Method for Credibility of Naval Gun Weapon System Emulation Test[J]. Fire and Command Control, 2014, 39(10): 36-40,44.
- [4] 韦金芬, 宋保维, 毛昭勇. 多阶段实验数据融合的 Bayes 可靠性评定模型[J]. 计算机工程, 2012, 38(9): 265-267. Wei Jinfen, Song Baowei, Mao Zhaoyong. Bayes Reliability Evaluation Model of Mutistage Experimental Data Fusion[J]. Computer Engineering, 2012, 38(9): 265-267.
- [5] 赵彬, 周中良, 王金福. 基于 MESE 的导弹仿真数据一致性验证[J]. 飞行力学, 2016, 34(6): 58-62. Zhao Bin, Zhou Zhongliang, Wang Jinfu. Consistency Validation of Missile Simulation Data Based on Maximum Entropy Spectrum Estimation[J]. Flight Mechanics, 2016, 34(6): 58-62.
- [6] 张宏江, 王树恩, 杜锋, 等. 基于 PSR 验前信息可信度的 Bayes 数据融合方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2014, 28(2): 98-102. Zhang Hongjiang, Wang Shuen, Du Feng, et al. Bayes Data Fusion Method Based on Prior Information Credibility of PSR[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2014, 28(2): 98-102.
- [7] 曹军海, 杜海东, 申莹. 基于改进 Bayes-Bootstrap 方法的系统可靠性仿真评估[J]. 装甲兵工程学院学报, 2016, 30(1): 95-98. Cao Junhai, Du Haidong, Shen Ying. System Reliability Simulation Assessment of System Reliability Based on Improved Bayes-Bootstrap Method[J]. Journal of Armored Force Engineering College, 2016, 30(1): 95-98.
- [8] 张金槐. 多源信息的 Bayes 融合精度鉴定方法[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(3): 93-97. Zhang Jinhui. Accuracy Detection Method Using Bayesian Multi-Sensor Data Fusion Technique[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2001, 23(3): 93-97.
- [9] Katherine E D G, Joseph H. Using Proportion of Similar Response to Evaluate Correlates of Protection for Vaccine Efficacy[J]. Statistical Methods in Medical Research (S0962-2802), 2015, 24(2): 273-286.