

基于多域分层的机载雷达作战实验系统设计

商龙¹, 王红卫¹, 汪欣², 陈游¹

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 空军装备部, 北京 100842)

摘要: 对机载雷达作战实验仿真提升雷达和电子战系统作战能力、验证战术方法的有效手段。按照仿真粒度的不同,采用多域分层的思想,构建作战域、实体域、信息域和物理域的作战实验仿真系统层次结构;将战术过程抽象为作战实体状态变化过程,采用时间-实体-任务-顺序的思想将电子战交互进程转变为实体变量组状态变化过程,实现了战术组件化;建立了不同重频下信号检测模型;分析了仿真实验的设计方法和时序过程;最后,结合典型的雷达对抗实验,对比单一干扰样式和复合干扰样式的干扰效果,验证了作战实验仿真系统的有效性。

关键词: 机载雷达; 作战实验; 多域分层; 战术组件化

中图分类号: V271.4; TN95 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)05-0019-05

Design of an Airborne Radar Campaign Experiment System Based on Multi-Filed Hierarchy

SHANG Long¹, WANG Hong-wei¹, WANG Xin², CHEN You¹

(1. Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. Equipment Department of China PLA Air Force, Beijing 100842, China)

Abstract: The simulation of airborne radar campaign experiment is an effective way to enhance campaign ability and validate the tactics of radar system and electronic warfare system. According to the difference in simulator granularity, the multi-filed hierarchy way was used to design the simulation system hierarchy structure in campaign field, entity field, information field and physical field. In this simulation system, the tactic process was abstracted as the changing process of campaign entity status. The thought of time-agent-task-order was applied to convert the process of electronic warfare intercommunion to the changing process of entity status, achieving the tactical componentization. The signal detection model in different repeat frequencies was established, and the design method and sequential process of the simulation experiment were analyzed. In the end, according to a representative radar jamming experiment, the effectiveness of the campaign experiment simulation system was validated by comparing the effect of singular jamming with that of compound jamming.

Key words: airborne radar; campaign experiment; multi-filed hierarchy; tactical componentization

0 引言

机载雷达电子战是夺取电磁控制权的重要手段,是实现遂行空中作战任务的重要组成部分,计算机仿真技术的飞速发展军事装备的作战实验和理论验证提供了良好的解决途径。当前雷达仿真研究的文献主要集中在3个方面:1)采用分布式仿真技术开发雷达

电子战系统^[1-3],提高了雷达电子战仿真系统的标准化程度;2)研究雷达电子战仿真模型设计方法^[4-7],采用组件化、元建模等手段,建立雷达电子战模型库,提高仿真系统的重用性和可扩展性;3)雷达电子战仿真的系统层次化设计^[8-9],建立层次化的仿真模型/组件体系,便于仿真模型/组件功能的明确以及仿真系统的维护和管理。标准化、组件化、层次化以及分布式仿真开发是雷达电子战仿真的发展趋势,组件的设计以及层次的划分也是其面临的主要问题。机载火控雷达电子战仿真是雷达电子战仿真的重要组成部分,对于机载火控雷达的作战实验仿真,采用组件化的开发和层

收稿日期:2013-06-14

修回日期:2013-07-23

基金项目:陕西省自然科学基金(2012JQ8019)

作者简介:商龙(1988—),男,陕西三原人,硕士生,研究方向为电子对抗理论与技术,电子对抗仿真技术。

次化的设计可以提高仿真系统的重用性、开放性和开发的效率。

本文通过自顶向下的设计对作战实验仿真系统进行分解,建立了多域分层的体系结构,并研究了其自下向上的组件设计与封装、实体实例化;结合系统关键组件——战术组件、信号检测组件的设计说明了组件设计的方法和步骤;设计了作战实验仿真方案以及实验步骤;最后结合典型雷达电子战作战想定给出了仿真系统的应用案例。

1 系统设计

域是指满足一定规律的元素集合。仿真系统的多域分层是基于仿真粒度的不同将仿真系统组件集合分为不同的子集。域中所包含的组件是在所对应层次上完成某项独立功能的单元,可直接应用于仿真系统。域与域之间具有层次关系,上一层域中的元素可由下一层域中元素聚合、组装生成,下一层域中的元素则是对上一层域中元素的分解。仿真系统的多域分层设计是自顶向下对仿真系统进行分解,将大的系统分解为具体的、小的组件。

1.1 系统体系设计

基于多域分层的机载雷达作战实验仿真系统主要用于对先进战机空空对抗、突防作战过程中武器装备性能和战术动作对作战效果的影响进行推演、评估。按照仿真粒度的不同,将仿真系统分为作战域、实体域、信息域、物理域 4 个层次,如图 1 所示。

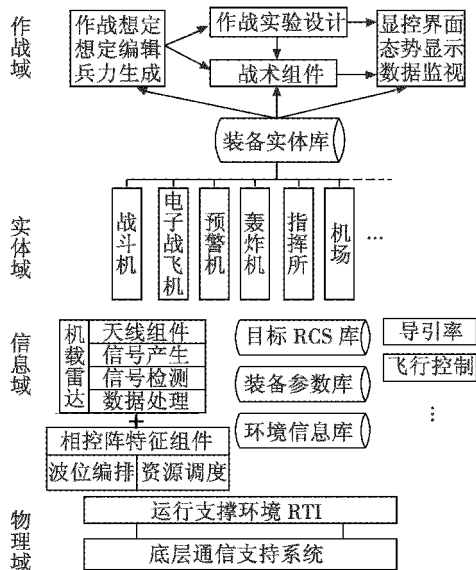


图 1 机载雷达作战实验系统体系结构

Fig. 1 The airborne radar campaign experiment system architecture

作战域是在作战层次上对仿真系统作战想定、作战实验以及战术过程组件化进行设计。实体域是对作

战域中所要加入的作战实体组件进行设计。信息域组件是在信息产生、截获、处理以及决策的层次上对实体组件进行分解。物理域主要为仿真提供基本的通信、时间管理服务,位于仿真系统的最底层。

有源相控阵雷达以其灵活的波束形成和调度能力^[10],能够满足现代战争对机载雷达多功能、低截获、自适应的要求成为现代机载雷达的发展趋势。在机载雷达作战实验仿真系统中,添加相应的相控阵雷达模块可以实现对机载有源相控阵雷达的作战实验仿真。

1.2 组件的定义与组装

组件是仿真原子功能模型,封装了实际的仿真业务逻辑,其定义如图 2 所示。

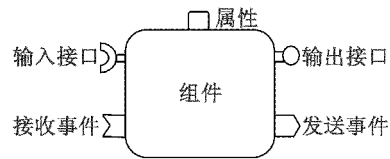


图 2 组件的定义

Fig. 2 The definition of the component

图中:接口一般用于雷达电子战周期性数据传递;事件一般用于作战仿真过程中临时性数据传递;属性一般用于组件状态的初始化。

将几个实现关联功能的组件通过组装可以生成更大的复合组件,复合组件同原子组件一样,其定义也是由输入/输出接口,接收/发送事件和属性组成。复合组件内部通过连线和映射统一内部接口和外部接口,如图 3 所示。

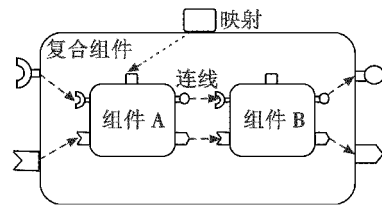


图 3 组件的封装

Fig. 3 Packaging of the component

1.3 实体的生成

实体是作战仿真实验系统作战域的基本单元。在仿真系统中,将飞机、导弹等武器装备和飞行员、指挥所等作战兵力都作为作战力量抽象为仿真实体。仿真实体的生成通过实体类和实体三维/军标模型的关联,实体参数的初始化实现。

2 关键组件设计

基于多域分层的机载雷达作战实验仿真系统,着眼于机载雷达作战使用过程中装备性能参数以及战术动作对作战效果的影响。战术组件和雷达信号检测组

件是仿真系统的关键组件。

2.1 战术组件设计

战术是指运用武器或军事单位攻击或防御敌人的活动。从仿真的角度理解,战术包含实施和被实施战术的实体,以及其交互的过程。通过战术活动过程,实体的状态发生了变化,即可以将战术活动理解为实体状态变化的过程。对战术组件的设计,采用“时间-实体-任务-顺序”(Time-Agent-Task-Order, TATO)的思想。TATO将装备及其功能模块的状态特性作为仿真对象,构建了与真实装备具有相同粒度特性的状态仿真模块。TATO以状态参量作为仿真的主变量,从而将敌我双方的交互过程转变为以TATO变量组之间的互动过程,解决以作战要素为关注对象的系统仿真问题。

战术组件作为对战术活动过程的抽象和封装,将战术活动过程看作是一个灰箱,则其结构为

$$T_{ac} = (T^i, A^i, T_k^i, O^i), i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中:

$$T^i = (T_a^{i,j}, T_d^{i,j}), j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$A^i = (A^{i,1}, A^{i,2}, \dots, A^{i,m}) \quad (3)$$

$$T_k^i = (T_k^{i,1}, T_k^{i,2}, \dots, T_k^{i,m}) \quad (4)$$

$$O^i = (O^{i,1}, O^{i,2}, \dots, O^{i,m}) \quad (5)$$

式中: T^i 为战术组件的时间基集合,其中, $T_k^{i,j}, T_d^{i,j}$ 表示第*i*个任务的第*j*个子任务到达时间和截止时间; A^i 表示第*i*个任务的实体集; T_k^i 表示第*i*个任务的任務集; O^i 表示第*i*个任务的执行顺序集。

战术组件的实现步骤。

1) 定义*i* = 1, 获取当前仿真时间指针*tp*。按照顺序队列*Oⁱ*中顺序最高的执行,当有顺序值相同的任务集时,截止时间早的任务先调度。判断若 $tp < \min \{ T_a^{i,j} \mid j = 1, 2, \dots, m \}$, 则转入2), 否则转入3)。

2) 依据任务集*T_kⁱ*对实体集*Aⁱ*状态属性进行更新。

3) 更新 $tp = \max \{ T_d^{i,j} \mid j = 1, 2, \dots, m \}, i = i + 1$, 如果*i* > *m*, 则转入4), 否则转入2)。

4) 此次战术调度结束。

2.2 信号检测组件设计

机载火控雷达多为PD体制。脉冲重复频率(PRF)的选择、强杂波背景下的信号检测是相对于其他平台雷达要解决的重要问题。仿真时回波信噪比需要根据高重频(HPRF)、中重频(MPRF)、低重频(LPRF)的不同分别计算。

2.2.1 旁瓣杂波 P_{slc} 的计算

对于HPRF,旁瓣杂波功率为

$$P_{slc} = A_{slc} \cdot \frac{1 - R^2/V^2}{V \cdot h^2} \quad (6)$$

式中: V 为载机地速; R 为目标距离变化率; h 为载机高

度; A_{slc} 为旁瓣杂波幅度。

对于MPRF,旁瓣杂波功率为

$$P_{slc} = \frac{1}{N_{DF}} \frac{P_t \lambda^2 G_s^2 \eta S h}{(4\pi)^2 R'^5} \quad (7)$$

$$R' = h + \text{mod}[R, 150 \cdot I_{PR}] \quad (8)$$

$$S = R' \frac{\pi}{2} \frac{c}{B} \quad (9)$$

式中: G_s 为天线旁瓣增益; η 为地面的反射系数; R' 为杂波单元到载机的距离; B 为信号带宽; N_{DF} 为多普勒滤波器FFT点数; I_{PR} 为发射脉冲重复间隔。

2.2.2 雷达不可检测区的计算

仿真时为了减少计算量,同时由于雷达不可检测区的客观存在,需要对雷达的距离、频域及角度盲区进行计算。

如果 $\text{mod}[\frac{2R}{c}, I_{PR}] < \tau$ (其中: R 为目标距离; τ 为发射信号脉宽), 则该目标处于目标距离盲区对于

HPRF, 目标频域盲区可以表示为

$$\left(f_{mlc} - \frac{B_{mlc}}{2} \right) < f_d < \left(f_{mlc} + \frac{B_{mlc}}{2} \right) \quad (10)$$

式中: f_{mlc} 表示主杂波频率; B_{mlc} 表示主杂波宽度。

对于MPRF, 目标频域盲区可以表示为

$$\left[\text{mod}\left(f_{mlc}, \frac{1}{I_{PR}} \right) - \frac{B_{mlc}}{2} \right] < \text{mod}\left(f_d, \frac{1}{I_{PR}} \right) < \left[\text{mod}\left(f_{mlc}, \frac{1}{I_{PR}} \right) + \frac{B_{mlc}}{2} \right] \quad (11)$$

如果目标落入该盲区, 则直接判定目标在该雷达帧内信噪比为零。

2.2.3 检测区目标回波信噪比的计算

雷达目标检测是基于综合信干比的, 综合信干比*S/J*由诸多因素决定, 包括目标回波功率、干扰信号功率, 杂波以及噪声等。

$$R_{s,N} = \frac{P_{rs}}{P_j/D_a + P_c/D_c + P_{slc} + P_n} \quad (12)$$

式中: P_{rs} 表示目标回波功率; P_n 表示接收机噪声功率; P_c 表示雷达接收的无源干扰信号功率; P_j 表示雷达接收的有源干扰信号功率; D_a 表示雷达综合抗干扰改善因子的抗有源干扰改善因子; D_c 表示雷达综合抗干扰改善因子的抗无源干扰改善因子。

2.2.4 信号检测概率的计算

雷达信号检测一般采用Neyman-Person准则, 仿真时, 首先设定虚警概率, 由某一时刻的综合信噪比确定该时刻目标的检测概率。

确定检测概率可以采用直接计算法和查表法。直接计算法根据一定虚警概率条件下的检测概率与信噪比的关系(或者近似计算公式)通过下式得出

$$P_d = 0.5 \times \operatorname{erfc}(\sqrt{-\ln P_{fa}} - \sqrt{R_{s,N} + 0.5}) \quad (13)$$

式中, $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du$, 为余误差函数。

确定目标的检测概率 P_d 后, 通过产生一组 $[0, 1]$ 平均分布的随机数, 判断该随机数是否大于等于 $1 - P_d$ 。如果大于, 判断为发现目标; 否则, 不能发现。

目标截获采用 k/m 准则, 如果 m 次检测有 k 或大于 k 次发现目标, 则判断为截获该目标。

3 作战实验设计

作战实验即操控作战能力或条件, 研究其后产生影响的方法, 是检验战术方法、论证武器装备的重要手段。

3.1 实验因子及水平设计

首先, 明确因子的概念。因子是可控的输入变量, 其变化可以影响输出的变化^[11], 因子水平是因子的取值。在作战实验仿真中, 因子设计通过提取想定中的

实体, 选择其中的参数作为因子, 因子水平设计根据实验对象的特征可以采用枚举、等间隔设计和随机因子的方法来获取。

3.2 实验方案设计

在实际问题中, 影响指标的因子往往有很多个, 对多因子的考察就涉及到实验方案的设计问题。最简单的实验方案设计方法就是全面设计, 即对每个因子的每个水平都设计一次实验, 这样一个 n 个因子 m 个水平的实验就会产生 n^m 个实验样本, 当 m 比较大时将会产生“维度灾难”。正交设计在减少实验样本数量的同时, 能够保证选取样本均匀分散、整齐可比特性。在本文仿真系统中, 设计了两种实验设计方式, 即全面设计和正交设计。当实验因子和水平数较少时, 采用全面设计, 当实验因子或水平数较多时, 采用正交设计。

3.3 作战仿真实验时序流程

系统作战仿真实验时序流程如图4所示。

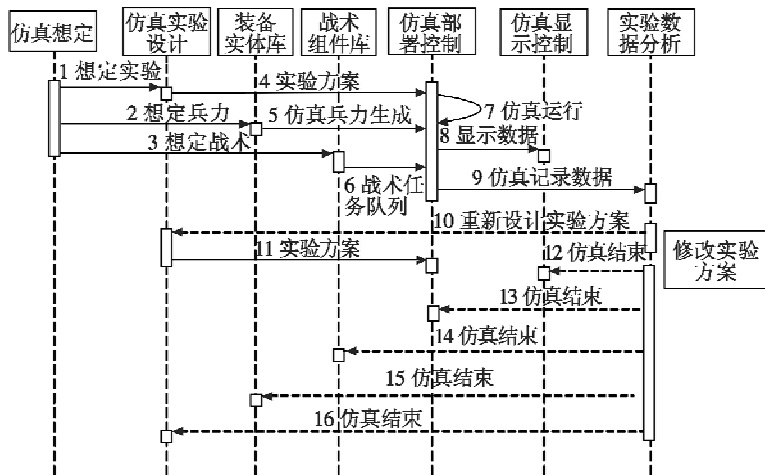


图4 作战仿真实验时序流程

Fig. 4 Combat simulation sequence flow

根据作战想定提取实验因子, 设计实验方案。根据想定兵力设置通过装备实体库部署仿真兵力, 并将想定战术生成战术任务队列实现战术组件的调用。在初始化仿真参数后, 通过仿真部署控制类控制仿真运行, 完成多趟实验仿真, 并记录观测数据。在仿真运行完后, 对实验结果数据进行分析, 得出仿真实验结论, 评估实验方案的效果。若未能达到实验预期, 则重新设计实验方案, 并进行仿真。

4 仿真实现与分析

4.1 仿真想定及实验方案

仿真实验想定为蓝方两架飞机突防, 红方在地面警戒雷达引导下派出两架飞机进行拦截, 在此空中对抗背景下, 研究红方某型干扰机对蓝方某型雷达干扰的效果。

根据仿真想定, 可以明确实验的目的, 即验证干扰对雷达的效果。干扰的目的是为了破坏雷达的探测功能, 因此将雷达能否对目标进行正确跟踪作为实验的指标。干扰的样式有很多种, 有源干扰主要有压制干扰和欺骗式干扰, 因此, 选取两种典型的干扰样式——噪声调制干扰(压制干扰)和速度拖引干扰(欺骗干扰)作为实验因子, 因子的水平为有、无。实验因子水平表如表1所示。

表1 因子水平表

Table 1 Factor levels

| 实验因子 | 水平值 | |
|--------|-----|---|
| 噪声调制干扰 | 有 | 无 |
| 速度拖引干扰 | 有 | 无 |

由于实验因子和水平较少, 实验样本总数为 2^2 个, 样本空间较小, 因此采用全面设计的方案设计实验

计划,如表2所示。以采样时间点上雷达成功跟踪率作为干扰效果和雷达抗干扰效果的评估指标。

表2 实验方案

Table 2 Experimental schemes

| 实验编号 | 实验名称 | 噪声调制干扰 | 速度拖引干扰 | 仿真次数 |
|------|---------|--------|--------|------|
| 1 | 未干扰 | 0 | 0 | 100 |
| 2 | 压制干扰 | 1 | 0 | 100 |
| 3 | 欺骗干扰 | 0 | 1 | 100 |
| 4 | 压制+欺骗干扰 | 1 | 1 | 100 |

4.2 仿真实验过程

依据想定和设计好的实验方案,在仿真开始前将表2中的实验方案加载到仿真部署中。仿真系统根据想定的兵力向联邦申请仿真兵力联邦成员的加入,表示红方飞机和蓝方飞机的4个仿真联邦成员加入仿真联邦,同时根据想定规定的战术,将战术组件生成战术任务队列,加载到仿真部署中。当仿真实验方案、仿真兵力以及战术任务队列全部部署完成后,启动仿真运行。

由于干扰和雷达抗干扰是一个动态博弈的过程,对实验指标雷达正确跟踪率应在多个时间段上进行采样,在实验中以雷达跟踪上为起始采样点,连续采样8个仿真周期,在第2个周期红方开始实施干扰,第4个周期雷达启动抗干扰措施,因此仿真实验数据的采样时间设置如表3所示。

4.3 实验结果及分析

依据想定设计好实验计划后,加载到仿真部署中,控制仿真运行,记录不同时刻 t 的实验数据。实验数据统计如表3所示。

表3 实验数据统计表

Table 3 The experimental data statistics %

| 实验编号 | t_1 | t_2 | t_3 | t_4 | t_5 | t_6 | t_7 | t_8 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 100 | 98 | 99 | 100 | 100 | 99 | 100 | 100 |
| 2 | 100 | 42 | 39 | 86 | 78 | 76 | 82 | 75 |
| 3 | 100 | 35 | 35 | 67 | 72 | 68 | 65 | 67 |
| 4 | 100 | 28 | 19 | 27 | 35 | 34 | 29 | 37 |

对比实验1与实验2、3、4的记录数据可以看出,在未实施干扰的情况下,雷达能够对目标稳定跟踪,当实施干扰时雷达对目标的跟踪能力下降。对比实验2、3、4中 t_2 、 t_3 与 $t_4 \sim t_8$ 的记录数据,在雷达采取抗干扰措施后,干扰的效果有所下降。对比实验2、3记录数据,两种不同的干扰样式对雷达的干扰效果相差不多,速度拖引干扰效果要略好于噪声调制干扰。分别对比实验2、4,实验3、4的记录数据,噪声调制干扰和速度拖引干扰复合的干扰样式的干扰效果优于单一干扰样式的干扰效果。

通过对仿真实验记录数据的分析,在红方干扰机与蓝方雷达的对抗过程中:1)干扰是有效的;2)雷达的

抗干扰措施是有效的;3)复合干扰比单一干扰样式效果好。

5 总结

基于多域分层的机载雷达作战实验仿真系统立足于机载雷达的作战使用,按照对战场态势从宏观到微观的认知过程,将仿真系统组件分为4个认知层次。分析了仿真系统的关键组件——战术组件、信号检测组件的实现方法,对仿真系统实验方案设计的方法和步骤进行了介绍,最后通过一个典型的作战想定,对实验方案部署和实验分析进行了介绍。作战实验仿真系统能够为战术方法的演示、论证提供有效手段,为装备设计和采购提供参考。

参考文献

- [1] 刘磊. 分布仿真技术与电子战仿真发展[J]. 现代雷达, 2009, 31(8): 80-84.
LIU L. Distributed simulation technology and development of EW simulation [J]. Modern Radar, 2009, 31(8): 80-84.
- [2] 萧海林. 基于HLA的舰艇电子战反导训练仿真系统设计[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(10): 2568-2571.
XIAO H L. Research on training simulation system based on HLA of antimissile electronic war on naval vessel [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(10): 2568-2571.
- [3] 毕大平, 祝本玉. 雷达电子战仿真系统设计[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(4): 393-397.
BI D P, ZHU B Y. Design of radar electronic warfare simulation system [J]. Information and Electronic Engineering, 2010, 8(4): 393-397.
- [4] 赵国辉, 司光亚, 李睿. 作战模拟系统中的雷达模型模板研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(2): 23-26.
ZHAO G H, SI G Y, LI R. Research on template of radar system functional model in air defense simulation system [J]. Computer Simulation, 2009, 26(2): 23-26.
- [5] 柳强, 李照顾. 基于构件的舰载通信电子战系统仿真[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(9): 115-119.
LIU Q, LI Z S. Research on simulation of shipboard communication electronic warfare system based on component [J]. Ship Science and Technology, 2010, 32(9): 115-119.
- [6] 张鸿喜, 张静瑜, 张志勇, 等. 基于元建模的雷达电子战仿真语言研究与应用[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(2): 269-274.
ZHANG H X, ZHANG J Y, ZHANG Z Y, et al. Research and application of radar EW simulation language based on

反馈回路中,具有适应性强和应用简单的特点。相信随着理论不断完善,去伪控制方法在实际中将会得到广泛应用。

参考文献

- [1] SAFONOV M G, TSAO T C. The unfalsified control concept and learning[C]//Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control, IEEE, 1994, 3:2819-2824.
- [2] PAUL A, STEFANOVIC M, SAFONOV M G, et al. Multi-Controller Adaptive Control (MCAC) for a tracking problem using an unfalsification approach[C]// CDC-ECC'05 44th IEEE European Control Conference on Decision and Control, 2005:4815-4820.
- [3] JUN M, SAFONOV M G. Automatic PID tuning: An application of unfalsified control [C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design, 1999:328-333.
- [4] 游乙龙,李昇平. 基于多控制器的直接自适应控制[J]. 控制工程,2008,15(3):291-294.
YOU Y L, LI S P. Direct adaptive control based on multiple controllers [J]. Control Engineering of China, 2008, 15 (3):291-294.
- [5] 任涛,高振华,祖国旗,等. 去伪控制方法的研究与应用[J]. 东北大学学报:自然科学版,2009,30(12):1678-1681.
REN T, GAO Z H, ZU G Q, et al. Research and application of unfalsified control [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science Edition, 2009, 30(12):1678-1681.
- [6] SAFONOV M G, TSAO T C. The unfalsified control concept: A direct path from experiment to controller [M]//Feedback Control, Nonlinear Systems, and Complexity, Springer Berlin Heidelberg, 1995:196-214.
- [7] WANG R, PAUL A, STEFANOVIC M, et al. Cost detection and stability of adaptive control systems [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2007, 17(5/6):549-561.
- [8] WANG R, SAFONOV M G. Stability of unfalsified adaptive control using multiple controllers [C]//Proceedings of the American Control Conference, 2005:3162-3167.
- [9] BROZENEC T F, TSAO T C, SAFONOV M G. Controller validation [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2001, 15(5):431-444.
- [10] VAN HELVOORT J J M. Unfalsified control: Data-driven control design for performance improvement [D]. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2007.
- (上接第23页)
- meta-modeling[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24 (2):269-274.
- [7] 徐忠富,王国玉,陈永光,等. 电子战仿真模型库系统建设方法[J]. 火力与指挥控制,2010,35(10):191-196.
XU Z F, WANG G Y, CHEN Y G, et al. Research on development of electronic warfare model repository[J]. Fire Control and Command Control, 2010, 35(10):191-196.
- [8] 张茜,刘光斌. 基于 HLA 的电子对抗多层次仿真系统设计[J]. 计算机与数字工程,2010,38(9):151-155.
ZHANG Q, LIU G B. Design of the multilayer simulation system for electronic countermeasure based on HLA[J]. Computer & Digital Engineering, 2010, 38(9):151-155.
- [9] 郭金良,汪连栋,赵锋,等. 舰载相控阵雷达仿真系统研究与实现[J]. 系统仿真学报,2010,22(11):2571-2574.
GUO J L, WANG L D, ZHAO F, et al. Research and realization of shipborne phased array radar simulation system[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(11):2571-2574.
- [10] 张光义,赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社,2006:8-30.
ZHANG G Y, ZHAO Y J. Technology of phased array radar[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006:8-30.
- [11] 胡剑文. 作战仿真实验设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社,2010:15-16.
HU J W. Experiment design and analysis of warfare simulation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 15-16.