doi:10.11887/j.cn.201406028 http://journal.nudt.edu.cn

随机性理论在情报监视侦察建模中的应用*

李元锋[1],石成英[1],彭浩然[2]
(1.第二炮兵工程大学 第一系,陕西 西安 710025;2.中国人民解放军61683部队,北京 100094)

摘 要:情报、监视、侦察(ISR)建模是战役级作战仿真建模的重点和难点,在仿真中不仅要求ISR模型能够准确地反映战场空间实体之间的感知交互,同时还要有较高的运行速度。为了解决此问题,以随机性理论为基础进行情报监视侦察的建模仿真,以区域侦察飞行器图像情报的建模全流程为例,阐述其主要环节的建模方法,并通过仿真实验验证了该套建模方法的适用性和有效性。与传统的确定性ISR建模方法相比,该方法在保证仿真精度的同时提高了运行效率,为战役级作战仿真中C⁴ISR建模与仿真提供了参考方法。

关键词:随机性理论;作战仿真;ISR模型;建模方法
中图分类号:TP391.9 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2014)06-158-06

The application of randomness theory in intelligence, surveillance and reconnaissance modeling

LI Yuanfeng[1], *SHI Chengying*[1], *PENG Haoran*[2]
(1. The First Department, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;
2. The PLA Unit 61683, Beijing 100094, China)

Abstract: The modeling and simulation of intelligence, surveillance, reconnaissance (ISR) is difficult and important for joint campaign-level simulation. In the simulation, ISR model is required that it not only can accurately reflect the perception interaction between battle space entities, but also has a high running speed. To solve this problem, the modeling method of joint campaign-level ISR based on randomness theory was proposed. It took the modeling procedure of regional reconnaissance of aircraft image intelligence for example and described the main links of the modeling method. The modeling method was verified by the simulation experiment, and it showed the validity and applicability of the modeling method. Compared with traditional certain ISR modeling methods, it improves the efficiency of simulation on the condition of insuring simulation precision, and it also provides a reference method of C⁴ISR modeling and simulation in joint campaign-level warfare simulation.

Key words: randomness theory; warfare simulation; ISR model; modeling method

情报、监视和侦察(Intelligence, Surveillance and Reconnaissance, ISR)是连接传感器、作战平台、指挥人员等一切作战要素的纽带,是作战仿真建模的重点和难点。美军的ISR建模在作战仿真领域发展比较成熟,在多套不同层级(战役级、任务级、交战级等)的仿真系统中实现了基于感知的战场环境侦测和处理,如联合分析系统(Joint Analysis System, JAS)[1]、联合战区级仿真系统(Joint Theater Level Simulation System, JTLS)[2]、兵力结构能力效能仿真系统(Force Architecture Capability Effectiveness Simulation System, 4ACES)[3]和扩展防空仿真系统(Extensive Air-Defense Simulation System, EADSIM)[4]等,这些系统能够对ISR对于作战效能的影响进行较好的定量与定性分析[5]。但在理论方面,仅有较多的公开的任务级、交战级ISR建模方法[6-8],关于战役级ISR建模方法的文献很少。

近年国内的研究中,对于任务级作战仿真和交战级作战仿真的ISR模型建模方法研究较多,如文献[9]针对任务级作战仿真的C⁴ISR体系建模技术进行了详细的描述,文献[10]针对交战级的电子对抗体系建模及校核、验证及确认(Verification, Validation and Accreditation, VV&A)[11]技术进行了系统的研究,文献[12-13]针对C⁴ISR的作战流程及体系结构使用了国防部体系结构框架[14](Department of Defense Architecture Framework 2.0, DODAF 2.0)和统一建模语言(Unified Modeling Language, UML)进行

* **收稿日期**:2014-06-09
基金项目:国家自然科学基金资助项目(91024030)
作者简介:李元锋(1982—),男,江苏仪征人,博士研究生,E-mail:jonasdhb@163.com;
石成英(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:sunyinchao523@163.com

了建模需求分析,但在战役级作战仿真领域针对 ISR 建模的研究却很少。如果直接将任务级、交战级作战仿真的 ISR 模型在战役级作战仿真中使用,模型的交互呈几何倍增加,计算量大,效率极低,需要在战役层建立高效的、贴近战场真实环境的 ISR 模型。

在这种平衡制约条件下,主要针对战役级作战仿真 ISR 模型建模方法进行探索,为了降低模型的运算量,提出了以随机性理论为基础的建模方法,以区域侦察的飞行器图像情报生产的全流程建模仿真过程为例进行说明。

1　问题描述

区域侦察的飞行器图像情报的循环流程如图 1 所示,根据指挥人员的情报收集计划,飞行器飞至任务区域上空,开始传感器的探测、搜索,并对区域内的战场空间实体进行探测、分类辨识和情报关联、融合,生成当前的战场态势供指挥人员使用。

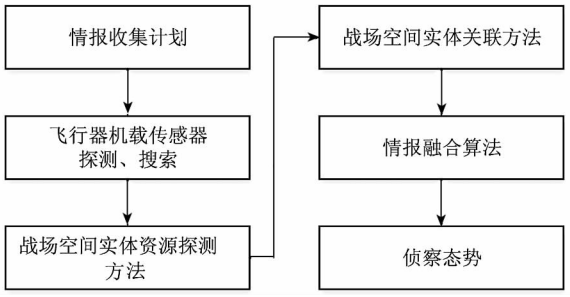


图 1　区域侦察飞行器图像情报的循环流程

Fig. 1　The cycle process of regional reconnaissance aircraft image intelligence

2　建模方法

战役级作战仿真中 ISR 模型采用随机性建模,不从物理机理上对传感器进行描述,而是从情报功能循环上对 ISR 进行建模,这样能够有效减少计算量,提高运行效率。战役级作战仿真系统仿真基本策略采用事件和消息调度法,以事件为核心进行分析,通过消息传递描述系统的演化过程。

2.1　建模实体表示

ISR 模型实体隶属于战场空间实体,采用面向对象技术进行建模,模型实体主要包括指挥控制、传感器、通信管理器、平台和资源管理器 5 大部分组成,如图 2 所示。

指挥控制是具有一定逻辑推理功能的软件组件,模拟战场空间实体的指挥和决策能力,包括

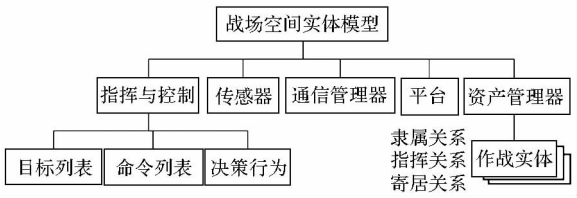


图 2　战场空间实体结构

Fig. 2　The entity structure of battle space

打击目标列表、命令列表和决策行为。传感器是战场空间实体的眼睛和耳朵,用于感知外界环境,具有探测、识别功能。资产管理器负责对战场空间实体的资源进行管理,决定了战场空间实体的能力,例如武器弹药和油料都属于资产,缺少资产就无法完成相应的功能,就需要补充。平台模拟战场空间实体作为运动物体的特性,有位置、速度、方向等属性。通信管理器使用通信网络与其他战场空间实体进行通信。

战场空间实体与其他战场空间实体之间可能有隶属关系、指挥关系,来模拟部队的编制编成和作战时的指挥关系。指挥关系可以在仿真过程中根据实际情况进行动态改变。战场空间实体之间还可能有寄居关系,例如位于航母上的飞行中队。

2.2　飞行器机载传感器的搜索方法

对于一个基于飞行器的区域侦察图像情报任务,平台并不物理通过搜索区域,静止在搜索区域中点,而是基于区域大小与平台的搜索率随机对区域搜索,在完成一次整个区域搜索时间内均匀分布战场空间实体的侦察活动,搜索率参数通过传感器的性能进行设置。如图 3 所示,展示了搜索区域内的图像传感器的随机移动视角区域的示意图。

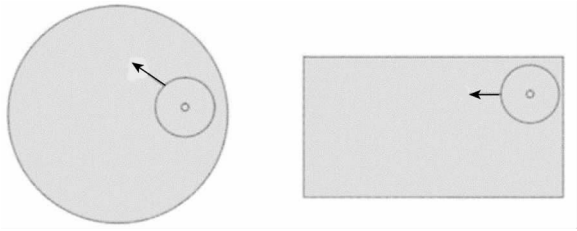


图 3　圆形/矩形侦察区域内随机搜索

Fig. 3　Random search within the circular/rectangular reconnaissance area

当传感器平台到达任务的盘旋点后,开始搜索,根据任务区域和平台/传感器的搜索率,计算出平台搜索区域的次数。

搜索率影响因子公式为:

$$RF_k = \begin{cases} \sum_{i=1}^{k-1} Q_i & k > 1 \\ 0 & k \leqslant 1 \end{cases} \tag{1}$$

式中，RF_k为基于搜集需求中要求的信息质量k的搜索率的减小量。Q_i表示平台和传感器相互作用的可能性，表示平台和传感器资产的搜索率。

根据要求的信息质量调整搜索比率，计算公式为：

$$SR_{\text{adj}} = SR \times (1.0 - RF_k) \tag{2}$$

式中，SR_{adj}表示修正后的搜索率，表示达到较高信息质量的时间增加度。SR表示平台传感器的基础搜索率。

平台完成一次搜索区域的时间计算公式为：

$$C_{\text{TIME}} = SA/SR_{\text{adj}} \tag{3}$$

式中，C_{TIME}为平台完成一次搜索区域的时间，SA为指定的搜索区域的面积。根据输入搜索任务的时长、搜索区域的大小和传感器自身的性能参数可以计算出在一次任务中传感器的搜索次数，并根据战场空间实体的探测时间更新感知态势。

2.3 战场空间实体资源探测方法

一旦出现战场空间实体的交互，传感器对目标实体进行探测和收集，对于每一次传感器和实体的交互，产生一个平台/传感器相关的交互质量的随机分布来确定资源分类的质量。

假定图像传感器的交互可以分成n个质量等级，传感器质量等级数与资源分类等级数相一致。确定交互质量后，每个资源开始处理，如果资源处于平台/传感器资源选项中，探测数据为非0概率，根据概率产生该资源将被探测的随机数，那么每个单一的资源依随机数按资源和交互质量所确定的分类概率进行分类。飞行器传感器分类质量示意图如图4所示。根据飞行器的位置、角度等，传感器正下方为情报质量最高区域，质量等级为4，最边缘为情报质量最低区域，质量等级为1，从中间到边缘质量等级分别为4、3、2、1。

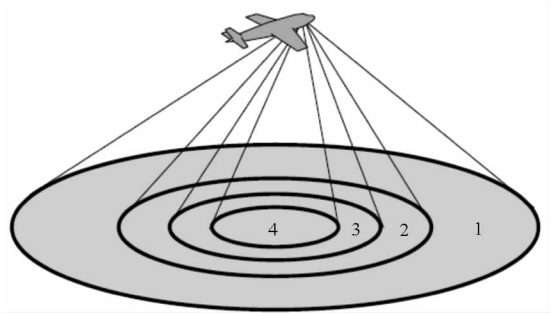


图4 飞行器图像传感器目标探测分类质量

Fig. 4 Target detection and classification quality of the aircraft image sensor

质量分类步骤包括：

1）确定该资源是否有探测概率，如果一个平台－传感器－资源没有探测概率，传感器将不报告任何当前资源项，否则，使用二项式(n, p)模型确定实际探测的数N，这里n为当前的资源数，p为探测概率；

2）如果N为0，传感器将不报告任何当前资源项，如果$N>0$，则根据分类概率（为计算的交互质量）产生一个多项式来分类每一个探测；

3）当所有的资源处理后，每个资源分类的总数存贮到传感器报告并进行融合。

交互质量的计算公式为：

$$K = f_{\text{BD}}(q_i) \tag{4}$$

式中，K为交互质量，f_{BD}为随机数产生器，q_i为在交互质量为i级时的概率。

因为需求搜索质量而造成的交互质量概率修正计算公式为：

$$q'_i = \begin{cases} \dfrac{q_i}{\sum_{j=1}^{4} q_j} & i \geqslant k \\ 0 & i < k \end{cases} \tag{5}$$

式中，q_i'为因需求搜索质量造成的交互质量的修正概率，k为必须达到的搜索质量。

战场资源探测数量计算公式为：

$$N_i = f_{\text{BD}}(p_i, n_i) \tag{6}$$

式中，N_i为资源探测的数量，p_i为资源i的探测概率，n_i为交互发生时探测范围内的现有资源数目。

当交互质量为K时，资源探测分类公式为：

$$C_{ijk} = f_{\text{BD}}(C_{ijk}, N_i) \tag{7}$$

式中，C_{ijk}为每个探测资源的分类。

2.4 战场空间实体的关联方法

在探测区域内探测到实体后，进行质量分类产生态势报告，将态势报告存储在联合战场空间的装备和兵力列表（Joint Theater Equipment and Force, JTEF）中，态势报告有2种情况：

1）态势报告战场空间实体ID匹配原态势ID，匹配成功；

2）如果匹配失败，则传感器报告结果为产生一个新的JTEF实体。当没有找到相对应的JTEF实体时，可能是相应的战场空间实体没有出现在原态势列表中或由于缺少更新其态势的信息而被删除。

态势更新过程如图5所示，JTEF_3实体在态势更新过程中产生了S_2实体，但没有对应的地理位置投影信息，那么会在JTEF实体列表中加入JTEF_{M+1}实体，同理，新增感知的S_5实体也会在列表中增加JTEF_{M+2}实体，由于JTEF_3实体没有证据证明更新，所以在列表中保持不变。

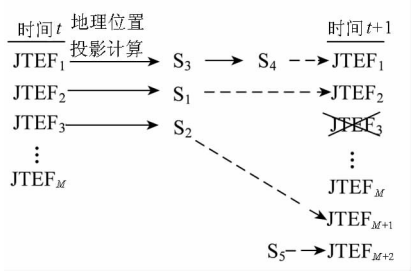


图 5　态势关联更新过程

Fig. 5　The course of association and updating battlefield situation

根据以前态势结合实体的运动趋势预测战场空间实体地理位置计算公式为:

$$LOC_{\text{projected}} = LOC_{\text{collection}} + (t_{\text{current}} - t_{\text{collection}}) \cdot v_{\text{perceived}} \tag{8}$$

式中,$LOC_{\text{projected}}$是预测战场空间实体地理位置,$LOC_{\text{collection}}$是上次战场空间实体报告的位置,$t_{current}$为查询态势的当前时间,$t_{\text{collection}}$为上次更新 JTEF 的时间,$v_{\text{perceived}}$为上次感知战场空间实体的速度。

战场空间实体关联判断公式为:

$$A = \begin{cases} 1 & LOC_{\text{projected}} - LOC_{\text{reported}} \leqslant A_{\text{threshold}} \quad \text{or} \\ & ID_{\text{sensor perceived}} = ID_{\text{JTEF perceived}} \\ 0 & \text{other} \end{cases} \tag{9}$$

式中,$ID_{\text{sensor perceived}}$为传感器感知战场空间实体 ID,$\text{ID}_{\text{JTEF perceived}}$为 *JTEF* 列表中感知的战场空间实体 ID,A 表示是否关联,取值为 1 表示关联,取值为 0 表示不关联。

2.5　情报融合方法

情报收集结束后,必须将传感器报告与当前感知的数据融合为新的感知提供指挥员决策,情报融合过程如图 6 所示。上半部分是战场的真实态势,下半部分是传感器感知的态势,虚线圆圈表示传感器的探测范围,平行线表示卫星传感器扫描区域,探测正在移动的部队。下半部分在现有战场态势基础上,结合初始情报准备,更新态势并进行决策,可以看出真实态势同感知态势的差异。

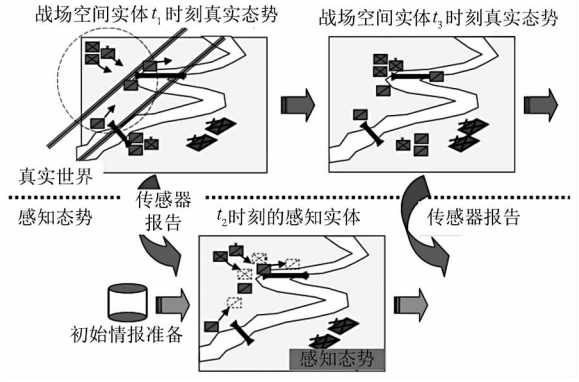


图 6　情报融合过程

Fig. 6　Intelligence fusion course

情报融合过程为探测资源项的传感器报告发现的 j 类型资源项的数量,为了融合报告的资源项数量与感知数量,首先计算资源项无偏估计实际的数量,该评估根据传感器的探测和分类报告与之融合的 JTEF 实体资源项的能力而进行,无偏估计及其方差通过反权重函数融合到 JTEF 实体的均值与方差,新的均值与方差指派到 JTEF 实体。如果 JTEF 实体没有被标识到其真实战场空间实体类型,则通过知识库用新的资源数确定实体类型。如果计算的实体类型返回一个比当前感知实体类型更高的分类等级,新的指派到新的 JTEF 对象。其他的信息如位置、位置偏差、速度、速率等直接更新到 JTEF 实体属性中。

资源 i 无偏估计的表达式为:

$$\begin{aligned} \hat{r}_i &= \frac{1}{m_i}\sum_j \hat{r_{i,j}} = \frac{1}{m_i}\sum_j \frac{X_j}{p_{i,j}} \times k_{i,j} \\ &= \frac{1}{m_i}\sum_j \frac{X_j}{p_{i,j}} \times \frac{\hat{n}_i \times p_{i,j}}{\sum_{i=1}^{I} \hat{n}_i \times p_{i,j}} \end{aligned} \tag{10}$$

式中,$\hat{r}_i$为资源 i 的无偏估计。X_j是传感器探测资源 i 为类型 j 的数量,$P_{i,j}$是资源 i 被探测为类型 j 的概率,m_i是非零$\hat{r_{i,j}}$个数的综合,$\hat{n}_i$代表了资源 i 的无偏估计的数目。

更新感知实体资源数量计算公式为:

$$\mu_i = \frac{\dfrac{m_i}{s_i^2} + \dfrac{\hat{r}_i}{v_i^2}}{\dfrac{1}{s_i^2} + \dfrac{1}{v_i^2}} \quad \sigma_i^2 = \frac{1}{\dfrac{1}{s_i^2} + \dfrac{1}{v_i^2}} \tag{11}$$

式中,μ_i 为感知实体资源更新数量,σ_i^2 为实体资源 i 的反向加权变量,s_i^2 为均值的不确定性,v_i 为感知实体的速度,其他参数参见式(10)。

有时,JTEF 实体收到的传感器报告的实体由于评估失去了资源,要克服这个问题,需要把权重参数应用到均值和方差的计算,计算公式为:

$$\hat{\mu}_i = \frac{\dfrac{\gamma_1 \times m_i}{s_i^2} + \dfrac{\gamma_2 \times \hat{r}_i}{v_i^2}}{\dfrac{\gamma_1}{s_i^2} + \dfrac{\gamma_2}{v_i^2}} \quad \hat{\sigma_i^2} = \frac{1}{\dfrac{2\gamma_1}{s_i^2} + \dfrac{2\gamma_2}{v_i^2}} \tag{12}$$

式中,$\gamma_1 = (1 - W_e)/2$, $\gamma_2 = (1 + W_e)/2$。$\hat{\mu}_i$为资源 i 的加权均值,$\hat{\sigma_i^2}$为资源 i 的反向加权方差。W_e为权重参数,权重参数范围为 0 ~ 1。

3　实验验证

为了验证本文的 ISR 模型是否有效,将传感

器模型写入基于 Agent 的战役级作战仿真系统，该系统使用平台为 Windows 操作系统，采用 VC ++语言编写。该仿真系统模型以拥有指挥控制模型的战场空间实体为基础，涵盖的作战域包括陆战、海战、空战、支援作战（情报监视侦察、空中加油等）、电子战和特种作战等。仿真系统包括想定开发、仿真实验管理、仿真运行和系统管理 4 大子系统，采用固定步长和事件触发相结合的方式，在该系统中建立检验 ISR 模型的实验验证想定。

设置红蓝双方对抗想定，红方战场空间实体包括 1 个舰队（由航母、驱逐舰、护卫舰、核潜艇等组成），舰队搭载预警机中队、直升机预警中队和战斗机中队。蓝方战场空间实体包括 1 个舰队（由航母、巡洋舰、驱逐舰、支援舰等组成），舰队搭载预警机中队、电子干扰中队和战斗机中队。红蓝双方主要使用区域侦察图像、雷达、声呐等传感器进行探测交互，通过“探测 - 决策 - 打击 - 评估”的流程实现红蓝双方海空交战。

想定持续时间为 2h，时间步长为 30s。对该想定进行大样本测试，运行样本为 500 次，系统评估指标包含事件发生时间、评估变量的瞬时事件状态值、单位时间内事件状态平均值和单位时间内的事件数量 4 种类型。以事件发生时间类指标为例，说明该类评估指标的采集方法。

事件发生时间类指标用来记录在指定时间内特定事件类型发生的时间（例如决策制定时间、消息发送时间、武器开火时间、传感器第一次探测目标时间等）。该类指标表明了发生该类事件的明确时间点。假设 $T(q,r)$ 是 r 个样本中指定事件类型的发生时间，对于 r 个样本中的每个发生时间点 q，存储下列中间数据：

$$\begin{cases} d_1(q,r) = \text{"Event\#}q\text{"} \\ d_2(q,r) = 1 \\ d_3(q,r) = \sum_{i=1}^{q}\sum_{j=1}^{\hat{r}} T(i,j) \\ d_4(q,r) = \sum_{i=1}^{q}\sum_{j=1}^{\hat{r}} T^2(i,j) \\ d_5(q,r) = \sum_{j=1}^{\hat{r}} T^2(q,j) \\ d_6(q,r) = \hat{r} \end{cases} \tag{13}$$

式中，$d_6(q,r)$ 中 $\hat{r}$ 必须满足 $1 \leqslant \hat{r} \leqslant r$。从这些中间数据计算事件发生和报告时间 t_q 的关系，t_q 时刻 r 个运行样本评估指标的样本均值 m 计算公式为：

$$m(t_q,r) = \begin{cases} \dfrac{d_3(q,r)}{\hat{r}} & \hat{r} \geqslant 1, q = 1 \\ \dfrac{d_3(q,r) - d_3(q-1,r)}{\hat{r}} & \hat{r} \geqslant 1, q > 1 \end{cases} \tag{14}$$

t_q 时刻 r 个运行样本评估指标的样本标准差 s 的计算公式为：

$$s^2(t_q,r) = \begin{cases} \dfrac{1}{\hat{r}-1} d_5(q,r) - \dfrac{1}{\hat{r}(\hat{r}-1)}[d_3(q,r)]^2 & \hat{r} \geqslant 2, q = 1 \\ \dfrac{1}{\hat{r}-1} d_5(q,r) - \dfrac{1}{\hat{r}(\hat{r}-1)}[d_3(q,r) - \\ \qquad d_3(q-1,r)]^2 & \hat{r} \geqslant 2, q > 1 \end{cases} \tag{15}$$

在 95% 置信度情况下样本均值 m 的样本标准方差计算公式为：

$$S = \frac{s(t_q,r)}{\sqrt{r}} \tag{16}$$

其他 3 类指标的计算方法和事件发生时间类指标计算方法类似。

该仿真实验想定采集指标包括红方传感器第一次目标探测时间和距离、第一次目标分类时间、第一次目标辨识时间、单位时间内未融合目标轨迹处理数量和已融合目标轨迹数量等，通过采集目标探测、分类、辨识、关联指标的全过程说明该 ISR 模型的有效性和适用性。

表 1 显示了第一次目标探测时间输出指标的部分输出结果，第一次探测时间指标在本想定中输出共有 112 项结果，由于篇幅所限列出了其中 4 项结果。表中，表项 ID 表示仿真中被探测的战场空间实体 ID，均值表示第一次探测时间的均值，时间单位为 h。

表 1 第一次目标探测时间输出指标部分结果

Tab. 1 Part of first target detection time measure results

被探测的战场空间实体 ID	均值(h)	标准方差	95% 置信度的样本标准方差
蓝方航母	0. 004 238 72	0. 000 697	0. 000 127
蓝方巡洋舰 01	0. 004 262 32	0. 000 671	0. 000 123
蓝方巡洋舰 02	0. 006 798 55	0. 001 037	0. 000 189
蓝方驱逐舰 01	0. 006 855 21	0. 001 051	0. 000 192

注：评估指标为第一次探测时间，样本数量为 500

表 2 列出了第一次目标分类时间输出指标的部分输出结果，表中 ID 表示在仿真中被进行目标分类的战场空间实体 ID，均值表示第一次探测时间的均值，时间单位为 h。

表 2　第一次目标分类时间输出指标部分结果

Tab. 2　Part of first target classification time measure results

被探测的战场空间实体 ID	均值(h)	标准方差	95% 置信度的样本标准方差
蓝方航母	0.005 37256	0.000 621	0.000 156
蓝方巡洋舰 01	0.005 432 68	0.000 350	0.000 134
蓝方巡洋舰 02	0.008 002 59	0.000 027	0.000 168
蓝方驱逐舰 01	0.008 692 46	0.002 867	0.000 125

注:评估指标为第一次目标分类时间,样本数量为 500

表 3 列出了想定输出的监视探测事件数量的均值。表中列出了在 0h ~ 0.5h, 0.5h ~ 1h,1h ~ 1.5h,1.5h ~ 2h 的监视探测事件的数量统计。

表 3　红方监视探测事件数量

Tab. 3　The number of red force surveillance detection events

时间(h)	均值(个)	标准方差	95% 置信度的样本标准方差
0.5	2 152.57	182.978	65.477 8
1	740.367	160.589	57.466 2
1.5	195.933	86.663 8	31.012 2
2	208.333	103.019	36.864 9

注:评估指标为监视探测事件数量,样本数量为 500

通过表 1、表 2、表 3,说明了本文的 ISR 模型可以有效地实现对于目标的探测、跟踪、分类和辨识并进行相应的关联和数据融合,说明该 ISR 模型是有效的和适用的,能够有效地体现传感器和目标探测之间的交互。

4　结论

针对区域侦察的飞行器的图像情报进行全流程建模,通过机载图像传感器探测搜索、战场空间实体探测、战场空间实体关联和情报融合,实现了探测、获取、处理和行动的情报循环流程,实现了基于战场感知的战役级作战仿真,相比以往基于战场事实的战役级作战仿真更加符合作战实际。该方法通过随机性理论有效地降低了模型的交互运算量,同时通过输入传感器性能参数的准确性保证了仿真结果的精确性,解决了运行效率和运行资源的矛盾性问题,为作战仿真 C^4ISR 领域建模提供了参考方法。

参考文献(References)

[1] Sweetser A, Barnes B, Melim P, et al. Implementation of the joint analysis system on TOW to enhance DoD analysis performance[C]//Proceedings of 2010 Department of Defense High Performance Computing Modernization Program Users Group Conference (HPCMP - UGC) IEEE, 2010: 327 - 332.

[2] Bowers III F A, Prochnow D L. Simulation for emergency response: JTLS - JCATS federation support of emergency response training[C]//Proceedings of the 35th Conference on Winter Simulation: Driving Innovation, 2003: 1052 - 1060.

[3] Dastjerdi A V, Tabatabaei S G H, Buyya R. An effective architecture for automated appliance management system applying ontology - based cloud discovery[C]//Proceedings of 10th IEEE/ACM International Conference on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid), 2010: 104 - 112.

[4] Gustavson P, Blais C, Daehler W R, et al. M&S asset discovery: services, tools and metadata[C]//Proceedings of The Interservice /Industry Training, Simulation & Education Conference (I/ITSEC). National Training Systems Association, 2011(1).

[5] Loerch A G, Rainey L B. Methods for conducting military operational analysis [M]. Arlington: Military Operations Research Society, 2007:511 - 560.

[6] Adamy D L. Introduction to electronic warfare modeling and simulation [M]. New York: SciTech Publishing, 2006: 1 - 16.

[7] Leachtenauer J C, Driggers R G. Surveillance and reconnaissance imaging systems: modeling and performance prediction[M]. Boston: Artech House, 2001.

[8] Brain A A, Lawrence J D, et al. Capability planning and analysis to optimize air force intelligence, surveillance and reconnaissance investments[M]. Washington: National Academies Press, 2012:13 - 19.

[9] 毛少杰,居真奇,李玉萍,等. C^4ISR 系统仿真实验技术[M]. 北京:军事科学出版社, 2012:87 - 141.
MAO Shaojie, JU Zhenqi, LI Yuping, et al. C^4ISR system simulation experiment technology [M]. Beijing: Military Science Publishing House, 2012:87 - 141. (in Chinese)

[10] 杨承志. 电子对抗作战仿真[M]. 北京:蓝天出版社, 2004:24 - 46.
YANG Chengzhi. Electronic countermeasures warfare simulation[M]. Beijing: Blue Sky Press, 2004:24 - 46. (in Chinese)

[11] DOD Modeling and Simulation(M&S) Verification, Validation and Accreditation (VV&A) [S]. Washington: Defense of Department of USA, 2009.

[12] 何红悦,王智学,董庆超,等. C^4ISR系统能力需求行为建模及验证[J]. 系统工程与电子技术,2012,34(6):1153 - 1160.
HE Hongyue, WANG Zhixue, DONG Qingchao, et al. Behavioral modeling and verification of C^4ISR system capability requirements [J]. System Engineering and Electronics, 2012, 34(6):1153 - 1160. (in Chinese)

[13] 张英,王智学,刘晓明,等. 面向服务的 C^4ISR 系统能力需求分析与建模方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2012,13(3):276 - 281.
ZHANG Ying, WANG Zhixue, LIU Xiaoming, et al. Service-oriented modeling for C^4ISR capability requirements analysis[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 13(3):276 - 281. (in Chinese)

[14] DOD Architecture Framework Working Group. DOD Architecture framework, Volume 2: architectural data and models version 2.02[S]. Washington DC: Department of Defense, 2011.