

基于事件驱动的任务级雷达对抗功能模块设计

于尧¹, 刘广建², 吕雅帅¹

(1. 装备学院 复杂电子系统仿真实验室, 北京 101400; 2. 河南洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

摘要: 针对国内雷达对抗仿真多采用时间步进的机制以及实体采用对象管理技术导致效率较低的问题, 提出了基于事件驱动的雷达对抗功能交互的建模方法, 该方法采用事件驱动机制, 将对象交互转化为功能交互; 为适应该方法, 重点对雷达对抗功能模块的交互关系及模块流程进行了设计, 平衡了雷达对抗模块的仿真粒度, 并基于 ROSS 仿真引擎采用设计的模块对导弹攻防案例进行仿真分析验证, 与 agent 仿真结果基本一致, 但是仿真时间却仅为 agent 建模仿真时间的 1/5, 证明了该方法的正确性和有效性。

关键词: 雷达对抗; 事件驱动; 功能模块; 功能交互

Design of Task-level Radar Countermeasure Function Modules Based on Event-driven

Yu Yao¹, Liu Guangjian², Lü Yashuai¹

(1. Equipment Academy, Laboratory of Science and Technology on Complex Electronic System Simulation, Beijing 101400, China; 2. Test Center of Electronic Equipment, Luoyang 471003, China)

Abstract: In allusion to the problems that the mechanism of time stepping and object management techniques more applied to radar countermeasure analysis simulation lead to lower efficiency, a function interaction method of event-driven radar confrontation modeling is introduced. The method uses the event-driven mechanism and transforms the object interaction into functional interaction. In order to implement this method, the radar interaction function module and process are designed to balance the simulation granularity of the radar confrontation module. The case of missile attack and defense is implemented using these modules in the ROSS simulation engine and the simulation results are basically consistent with the agent simulation, but the time is only 1/5 of the agent modeling and simulation, which proves the correctness and validity of the method and modules.

Keywords: radar countermeasure; event-driven; functional module; functional interaction

0 引言

任务级^[1-2]的雷达对抗仿真属于对针对复杂问题的分析仿真, 目的是寻找最优方案结果及提供辅助决策等, 仿真往往需要执行几百甚至上千次, 因此对仿真效率有很高的需求。当前国内在雷达对抗研究中更多的是时间步进机制^[2-6], 为方便实体装备的管理, 采用对象的管理技术, 但时间步进机制的“空转”现象、对象管理技术中对象间的锁操作、同步处理增加了仿真额外的开销以及实体内部为串行执行, 这些问题都极大影响了仿真效率。因此作者提出了基于事件驱动的雷达对抗功能交互的建模方法, 该方法将时间步进的交互转化为事件驱动的功能交互, 将功能模块映射到多个逻辑进程中, 并以并行仿真技术运行以缩短仿真时间。

而本文重点对该方法需要的功能模块进行设计, 该设计需要注意平衡模型的仿真粒度, 若粒度过粗则会使得模型的适用场景减少, 若粒度过细则^[6-12]会使得模型产生不必要的计算,

影响仿真的效率。首先针对典型装备进行功能提取, 形成事件驱动^[13]的功能交互模块, 功能模块设计是将雷达对抗的数学模型及蒙特卡罗仿真方法相结合。并在 ROSS 引擎中对该功能模块组合进行了简单应用, 为最终实现并行离散事件仿真高效解决任务级雷达对抗作战分析问题提供了模型基础。

1 雷达对抗典型功能模块的事件交互分析

传统的雷达对抗研究是基于 HLA 分布式仿真, 采用的是对象管理技术, 每个实体内部的功能模块是串行执行的, 而且对象间的锁操作、同步处理增加了仿真额外的开销, 这将对仿真效率有很大的影响, 因此提出基于事件驱动的雷达对抗功能交互的建模方法, 该方法采用事件驱动机制, 将对象交互转化为功能交互, 将功能模块映射到不同的逻辑进程上, 如图 1 所示, 每个模块被映射到不同的逻辑进程, 模块间仍以事件交互, 利用并行仿真技术能够发挥原本对象内部的并行性。模块如何映射到逻辑进程需要根据具体仿真场景进行判断, 其原则是模块交互频繁的应在同一逻辑进程上, 因为逻辑进程的切换也将有额外的开销, 这个问题本文不具体探讨, 本文重点研究功能模块的交互分析及设计。

在体系对抗的复杂态势下, 交战双方的参战实体单位往往达到上百个甚至更多。在电子攻防联合作战场景中, 分为进攻方与防御方, 进攻方一般以大量的电子侦察、干扰设备和硬杀伤武器系统构成攻击体系, 防御方则会组织防御体系, 一般包括常规预警雷达、雷达干扰及导弹干扰等。

每个交战实体所面临的交互实际上是功能的交互, 而往往

收稿日期: 2017-07-06; 修回日期: 2017-08-30。

基金项目: 国防预研基金项目(9140C9202140C92003)。

作者简介: 于尧(1992-), 男, 辽宁瓦房店人, 硕士研究生, 主要从事信息系统技术与应用方向的研究。

刘广建(1974-), 男, 河南扶沟人, 硕士, 高级工程师, 主要从事电子对抗、电子系统建模仿真与评估方向的研究。

吕雅帅(1981-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事计算机体系结构、计算机仿真方向的研究。

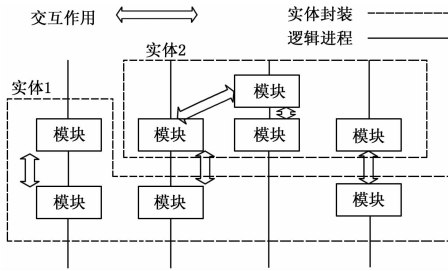


图 1 功能模块在逻辑进程映射示意图

一个装备实体可能是若干个功能的集合, 虽然每个交战实体所面临的交互复杂, 但功能交互是固定的, 因此采用功能模块交互将降低建模的难度并具有良好的重用性。

事件结构用于描述仿真状态和内部交互的变化, 事件触发条件反映了该事件的产生原因, 事件引发行为则反映了该事件导致的结果, 从而能够完整表征仿真因果关系。本文从侦察、决策、干扰角度提取了 6 个典型功能模块, 其事件的交互作用如图 2 所示, 其中干扰系统分为两类, 一类是对雷达进行干扰, 主要表现为压制、假目标、角度欺骗以及破坏跟踪, 另一类是对导弹进行干扰, 主要体现在对来袭导弹干扰, 形成新的导弹瞄准点。侦察系统是决策系统和干扰系统的前提与基础, 侦察系统 (雷达侦察模块) 将侦察的情况传递相应的决策事件给决策系统 (雷达、导弹干扰决策模块), 决策系统将相应的干扰事件传递给干扰系统 (雷达、导弹干扰效果模块) 产生相应的干扰效果, 干扰系统将干扰结果作用于对应实体的功能模块, 例如导弹的干扰效果体现在移动模块, 雷达干扰效果体现在雷达侦察模块。

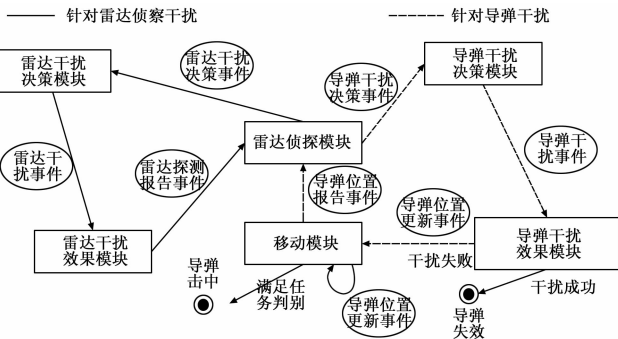


图 2 功能模块的事件交互分析示意图

2 事件驱动的功能模块模型设计

从雷达对抗整体的角度, 根据交互作用将其分为 6 个模块: 雷达侦察模块、雷达干扰决策模块、雷达干扰效果模块、导弹干扰决策模块、导弹干扰效果模块、移动模块, 期望以 6 个模块简化任务级雷达对抗分析仿真的场景设计, 这里忽略了复杂环境、以及作战人员的影响, 若需要考虑应该增加相应的模块。体系对抗条件下, 仿真效果更多地取决于装备的典型作战能力, 这种典型作战能力主要体现在其表达出的功能上, 而不需要对其内部实现机理进行仿真, 因此采用功能仿真即可, 传统的雷达系统仿真采用时间步进机制, 这与仿真应用的目的相关, 对此我们可将研究其数学模型机理, 将其转化为相应的功能仿真, 其特点是通过数学模型计算得到已知概率, 然后通过蒙特卡罗法进行统计试验。

2.1 雷达侦察模块

雷达侦察是雷达对抗的重要组成部分, 是从敌方雷达辐射的信号中提取信号参数和方向数据, 然后进行威胁判断、告警显示。不少文献将雷达侦察和雷达系统进行区分, 本文将两者均称为雷达侦察, 按照雷达是否辐射电磁波将其分成主动探测和被动探测两个方面。该模块需要一个共享的全局可探测列表, 该表用来保存雷达 ID 号、目标 ID, 该表表示该 ID 的雷达已经探测到该 ID 的目标, 其列表标记参数有两个, 压制标记参数、虚假标记参数, 若雷达遭到压制干扰, 则目标不可探测, 进行压制标记, 直到压制解除后, 才恢复正常, 虚假标记参数指的是由于欺骗干扰等手段产生的虚假点的信息。其基本流程为:

1) 模块的启动: 所有的目标将会给侦察模块发送自身的位置事件, 即目标的位置报告事件, 当接收到该事件后, 雷达侦察模块启动并执行模块内的活动。

2) 雷达粗过滤:

为减少计算量, 按照以下准则进行粗过滤。

雷达工作频段、脉宽、重频不处于侦察范围内; 侦察时段内未开机的雷达。

3) 距离和角度上的判别:

(1) 天线对准的角度 θ_i 判别: 目标不在 θ_i 角度范围按照平均副瓣增益计算, 在角度范围内按照主瓣增益计算。

(2) 雷达可搜索距离的判别: 距离判别主要是从雷达探测范围最大值和雷达视距中选择二者的最小值, 当目标距雷达小于该值, 则认为满足距离判断。

$$R_{\max} = \sqrt[4]{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma / (4\pi)^3 L S_{\min}} \quad (1)$$

$$R_{\max} = \sqrt[2]{P_t G_t G_r \lambda^2 / (4\pi)^2 L S_{\min}} \quad (2)$$

式 (1) 表示主动雷达探测, 式 (2) 表示被动雷达, R_{\max} 为雷达探测距离最大值; P_t 为雷达发射机功率; G_t 雷达发射天线增益; G_r 雷达接收天线增益; σ 目标的雷达截面; λ 雷达工作波长; L 综合损耗因子; S_{\min} 为雷达接收机的灵敏度; R 为目标距雷达的距离。

雷达视距公式为:

$$R_s = 4120(\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2}) \quad (3)$$

其中: $H_1(m)$ 为雷达天线架高度; $H_2(m)$ 为目标高度。

当距离上符合 $R < \min(R_{\max}, R_s, R_t)$ 即满足距离判别, R_t 为雷达受干扰后的压制距离, 在未接受雷达干扰模块传来的数据时, 该值为无穷大。

4) 计算雷达的检测概率: 雷达目标检测综合信干比 S/R 模型为:

$$S/R = \frac{P_s}{P_j/D_a + P_c/D_c + P_n} \quad (4)$$

式 (4) 中的 P_s 为回波信号功率, P_n 接收机噪声信号功率; P_c 雷达接收的无源干扰信号功率; P_j 雷达接收的有源干扰信号功率; D_a 雷达综合抗干扰改善因子的抗有源干扰改善因子; D_c 雷达综合抗干扰改善因子的抗无源干扰改善因子。

根据 North 提出检测概率模型的近似运算方法, 其公式表示为:

$$P_d \approx 0.5 \times \text{erfc}(\sqrt{-\ln P_{fa}} - \sqrt{S/R + 0.5}) \quad (5)$$

式 (5) 中的 P_{fa} 为虚警概率, $\text{erfc}()$ 为补余误差函数, 其表达式为:

$$erfc(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-v^2} dv \quad (6)$$

5) 目标检验: 所有的检验问题采用蒙特卡罗试验的方法, 生成 $0 \sim 1$ 随机数 u 。若 $u \leq P_d$, 则目标侦察成功, 否则侦察失败。若侦察成功, 将该目标 ID 及雷达 ID 保存至可探测表, 并生成相应的决策事件, 有负责决策的系统接收。如果仿真中不存在单独的指挥决策系统, 则可直接生成需要执行模块的相应的事件, 如 (雷达或导弹) 干扰决策事件、导弹袭击事件等。

2.2 雷达干扰决策模块

干扰决策模块用于模拟雷达资源如何调度, 将侦察结果与威胁库进行配对, 对未识别的侦察结果进行经验威胁判断 (例如雷达重频、功率越高等), 给出目标的威胁度, 安排最合适的干扰资源, 该模块需要维护一个资源管理表, 以及一个威胁库, 资源表有一个资源状态参数, 记录该资源是使用中还是空闲中, 威胁库存储各类威胁型号的威胁等级以及适合各型号适合的干扰资源的信息。其基本流程为:

1) 模块的启动: 当接收到雷达干扰决策事件后, 雷达干扰决策模块启动并执行模块内的活动。

2) 雷达是否被干扰状态判别: 若需要干扰雷达已经被干扰, 则退出该模块, 若未被干扰, 则执行下一步。

3) 威胁匹配模型: 匹配因子 P 可按式 (7) 计算:

$$P = 1 - \left(\frac{|RF_1 - RF_0|}{RF_0} + \frac{|PW_1 - PW_0|}{PW_0} + \frac{|PRF_1 - PRF_0|}{PRF_0} \right) / Ref \quad (7)$$

式中, RF 、 PW 、 PRF 分别为雷达频率、脉宽、重频; 脚标 1 表示测量值, 脚标 0 表示威胁库装订值; Ref 为参考阈值; 如果没有某项参数测量能力或未装订某项参数, 则认为该项偏差为 0。

当 P 大于匹配门限阈值, 则成功识别出该威胁型号, 确定威胁等级。

4) 经验威胁判断模型: 对于未匹配侦察结果, 若重频越高 (其次按干扰功率最大计算), 则认为威胁等级越高, 但经验威胁目标的威胁等级弱于所有威胁库目标。

5) 干扰资源配置: 该模型负责资源管理, 根据威胁库的信息分配合适的资源, 对使用过的资源进行标记, 并生成雷达干扰效果事件。

2.3 雷达干扰效果模块

雷达干扰分为遮盖性干扰和欺骗性干扰, 典型的遮盖性干扰有噪声干扰, 典型的欺骗性干扰有距离、角度、速度欺骗干扰及假目标诱饵干扰。该模块将雷达干扰效果分成四类, 主要表现为压制、欺骗、假目标、拖引等。该模块需要对共享的可探测列表进行操作, 以便对被压制的雷达 ID 和目标 ID 进行相应的标记。其基本流程为:

1) 模块的启动: 当接收到雷达干扰效果事件后, 雷达干扰效果模块启动并执行模块内的活动。

2) 干扰粗过滤: 为减少计算量, 剔除不符合以下条件的干扰:

- (1) 该雷达工作频段不在干扰机工作频段范围;
- (2) 干扰机关机。

3) 距离和角度上的判别:

(1) 干扰角度判别: 干扰机对准方向不在雷达天线角度范

围, 雷达天线对于干扰机的增益 $G_r(\theta_j)$ 按照副瓣计算, 在雷达天线角度范围按照主瓣计算。雷达、干扰机、目标三者关系如图 3 所示。

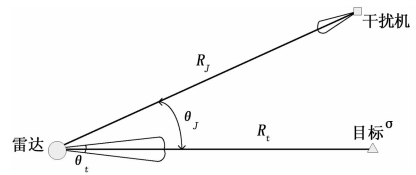


图 3 雷达、干扰机、目标位置关系示意图

(2) 距离判别: 根据干扰方程可得到干扰机能够实施干扰的距离判别, 如式 (8) 所示。

$$R_j \leq \sqrt{\frac{P_j G_j G_r 4\pi\gamma R_t^4}{P_r G_r^2(\theta_j) \sigma K_j}} \quad (8)$$

式 (8) 中, P_j 、 G_j 为干扰机发射功率和天线增益, P_r 、 G_r 为雷达发射功率和天线增益; γ 为干扰信号与雷达信号极化损失系数; R_t 为雷达与目标的距离; R_j 为雷达与干扰机的距离, σ 为目标截面积; K_j 为压制系数。

4) 雷达干扰效果计算:

(1) 雷达压制效果计算: 被干扰雷达的雷达搜索半径如式 (9) 所示:

$$R_r = \sqrt[4]{K_j \frac{P_r G_r^2(\theta_j) \sigma R_j^2}{P_j G_j G_r 4\pi\gamma}} \quad (9)$$

被压制的雷达 ID 和目标 ID 在可探测列表中进行标记, 表示该雷达无法探测该目标, 但可被其他雷达探测, 直到压制干扰解除为止, 被压制的雷达无法进行范围外的目标侦察。

(2) 雷达假目标诱饵效果: 生成 $0 \sim 1$ 随机数 u , 假目标诱饵概率为 P_0 。若 $u \leq P_0$, 按照目标点的参数生成相应的假目标点, 并在可探测表内进行虚假目标标记, 否则干扰无效果。

(3) 雷达欺骗效果: 生成 $0 \sim 1$ 随机数 u , 欺骗成功概率为 P_1 。若 $u \leq P_1$, 按照概率生成虚假信息及位置点, 雷达对干扰机保护的点迹丢失, 并在可探测表内进行虚假目标标记, 保护的点迹 ID 标记为不可探测, 否则干扰无效果。

(4) 雷达拖引干扰效果: 生成 $0 \sim 1$ 随机数 u , 拖引成功概率为 P_2 。若 $u \leq P_2$, 雷达对干扰机保护的点迹丢失, 将可探测表内保护的点迹 ID 标记为不可探测, 否则干扰无效果。

若成功干扰, 生成相应的效果事件, 对可探测列表进行修改。若干扰未成功, 则不产生效果。

2.4 导弹干扰决策模块

导弹干扰决策模块用于模拟导弹干扰资源如何调度, 根据概率确定能否识别导弹型号信息以及导弹的威胁度, 然后安排合适的干扰资源及释放时机。该模块同样需要维护一个资源管理表 (同雷达干扰决策模块)。其基本流程为:

1) 在接收导弹干扰决策事件后启动该模块;

2) 导弹是否为失效状态判别: 若需要干扰导弹已经被干扰, 则退出该模块, 若未被干扰, 则执行下一步。

3) 导弹识别:

(1) 计算导弹与目标的相对距离变化曲线;

(2) 计算识别概率, 按照式 (10) 计算:

$$P_n = P_3 \cdot \sqrt[4]{\frac{R_0}{R_n}}, \text{ 且若 } P_n > 1 \text{ 则 } P_n = 1 \quad (10)$$

式中, P_3 为识别表中的识别概率。

(3) 生成随机数 u , 若 $u \leq P_0$ 则识别成功, 输出导弹型号及识别时刻、干扰时刻; 否则, 若 $R_n \leq R_{\min}$ 则识别失败;

4) 干扰资源配置: 干扰资源配置策略分为乐观策略和保守策略。初始阶段采用乐观策略, 即干扰资源尽早启用; 当干扰资源总数消耗一半以后采用保守策略, 即干扰资源尽量晚启用, 并根据导弹的威胁度确定导弹干扰的顺序。

干扰资源配置后, 产生导弹干扰效果事件。

2.5 导弹干扰效果模块

导弹干扰分为有源和无源干扰, 常见的有源干扰有有源诱偏、拖引和交叉眼干扰, 其中有源诱偏仅对被动雷达导引头有效, 拖引和交叉眼仅对主动雷达导引头有效; 常见的无源干扰有冲淡箔条弹、质心箔条弹 (频率的作用忽略)、曳光弹和遮蔽弹。本节将几种干扰效果分成三类, 诱偏效果、拖引效果和压制效果。有源诱偏、交叉眼、质心箔条弹、红外曳光弹均属于诱偏效果, 拖引干扰属于拖引效果, 冲淡箔条弹和遮蔽弹属于压制效果。导弹干扰效果模块是把导弹干扰方式转化为导弹受干扰的效果, 其基本流程为:

1) 模块的启动: 当接收到导弹干扰效果事件后, 导弹干扰效果模块启动并执行模块内的活动。

2) 导弹是否为失效状态判别: 若导弹已失效, 则直接退出该模块, 若未失效则执行下一步。

3) 干扰效果计算。

4) 干扰样式匹配及特性: 导引头样式与当前可用干扰样式匹配, 即被动雷达导引头与有源诱偏干扰匹配, 或主动雷达导引头与拖引、交叉眼匹配; 质心箔条弹和红外曳光弹都表现为诱偏效果, 具备同时干扰多发导弹的特性。

冲淡箔条弹和遮蔽弹都表现为压制效果, 具备同时干扰多发导弹的特性。

5) 导弹诱偏干扰效果计算: 区分是否为交叉眼干扰, 若是该诱偏效果只对一个干扰对象起作用, 其他的可同时干扰多发导弹。根据干扰弹发射距离和发射方向, 计算得到诱饵位置, 以二维平面坐标系表示; 诱饵的质心可看作诱饵弹爆炸时的位置, 则诱饵弹的干扰概率为 P_0 , 生成 $0 \sim 1$ 随机数 u 。若 $u \leq P_0$, 则干扰成功, 导弹失效; 否则, 导弹则打向诱饵质心。

6) 导弹压制干扰效果计算: 根据干扰弹发射距离和发射方向, 计算得到每个弹的遮蔽区中心; 计算导弹与打击目标连线, 若距离某个弹遮蔽区中心距离小于遮蔽区半径, 则形成遮蔽; 对于形成遮蔽的导弹, 生成 $0 \sim 1$ 随机数 u , 若小于有效遮蔽概率, 则导弹丢失目标。

7) 导弹拖引干扰效果计算: 生成 $0 \sim 1$ 随机数 u , 若小于拖引成功概率, 则导弹丢失目标且无新瞄准点, 导弹失效。

若干扰失败, 则无影响。若干扰成功, 由于状态内并不执行什么操作, 则目标状态直接转为失效, 若失效状态内需要执行其他活动, 则需要生成相应的事件。

2.6 移动模块

移动模块是针对某一移动实体而言, 移动模块在交互过程中有很重要的地位, 因为正是存在有位置变化的实体, 事件触发的活动才会有变化, 事件的循环才有意义。其中导弹可直接认为是一个移动模块, 因此移动模块可作为整个仿真中实现循环的一个模块。其基本流程是:

1) 模块的启动: 当接收到目标位置更新事件后, 移动模块启动并执行模块内的活动。

2) 判定该移动实体是否失效。

3) 位置计算: 通过实体的飞行轨迹, 计算移动后的坐标位置, 为简化移动模块, 我们只需要考虑空间位置关系而不考虑目标姿态等计算, 也不考虑目标运动学模型, 在要求并非严格的情况下, 可以采用平面坐标系, 其中实体在空间的高度只作为其中的一个属性, 由于采用离散事件仿真, 高度值可认为是瞬间变化的, 该属性也将决定是否在雷达侦察、干扰及武器攻击范围。

4) 任务判别: 任务判别可以分成两类: 第一类距离判别是基础, 以轰炸机及导弹为例, 导弹的任务完成即距目标的距离为 0, 轰炸机的目标为到达规定地点投放炸弹, 即与目标的距离为 0, 然后原路返回, 即与降落地点的距离为 0; 第二类效果判别, 它是基于距离判别后, 对效果有要求的, 例如战斗机以击毁对面装备为目标, 那么在到达规定地点后发射导弹后, 如果导弹未完成目标, 原位置持续作战, 直至弹药量为 0 后撤离, 干扰机则在掩护其脱离敌方雷达探测范围后再做撤离。

5) 位置更新: 根据位置计算和任务判别, 重新对实体的位置更新, 进入仿真下一次循环。

如果该实体没有失效, 则将该模块的位置报告事件报告给所有相关的实体, 以开启再次循环, 如果该实体失效, 目标状态直接转为失效状态。

3 建模仿真及分析

本节试探究事件驱动的功能模块设计能否适用于解决雷达对抗中导弹攻防问题, 仅对固定雷达侦察干扰设备及导弹进行建模。整个事件模块交互图如图 4 所示, 当接收到导弹实体传来的导弹位置报告事件后进入侦察状态, 执行相应的活动, 在成功检测到导弹目标后生成干扰决策事件。当接收到干扰决策事件后, 进入干扰决策状态, 执行干扰资源配置, 生成导弹干扰效果事件, 发送到导弹实体。导弹实体接收到导弹命中事件, 进入导弹命中状态, 执行导弹命中统计。

现在 Ubuntu Kylin 15.10 系统下, 基于 ROSS 仿真引擎建立上述的离散事件仿真模型, 明确每个模块的状态定义及转换逻辑, 对各参数接口进行设计并做好初始化, 对每个模块进行 C 语言编程实现。

现对敌方分布的 128 个地面目标进行导弹袭击, 每个目标上空都配有一个雷达及干扰设备, 导弹发射地距离目标群中心 1 000 km, 导弹飞行速度为 306 m/s, 雷达功率为 10 kw, 雷达天线增益为 6, 工作频率为 9.7 GHz, 波长 $K = 0.05$ m, 接收机灵敏度 $S = 10^{-7}$ W, 每个干扰机干扰资源为 30 个, 经 ROSS 仿真可得需要 264 枚导弹才能完成任务, 用时 1.28 s, 仿真截图如图 5 所示, 基于 Agent 仿真所得结果 258 枚, 用时 7 s, 仿真截图如图 6 所示, 数据结果相差并不是很大, 但是仿真时间却仅为 agent 建模仿真的 1/5, 因此证明了该方法及模型的正确性及有效性。

4 结束语

根据雷达对抗分析仿真效率要求, 提出了基于事件驱动的雷达对抗功能交互的建模方法, 该方法的功能交互能够节省更多的对象管理带来的额外开销。本文重点平衡了雷达对抗仿真模型的仿真粒度, 避免了细粒度仿真的大量计算, 有尽可能适应更多的场景, 并用该方法的对雷达对抗中导弹攻防问题进行

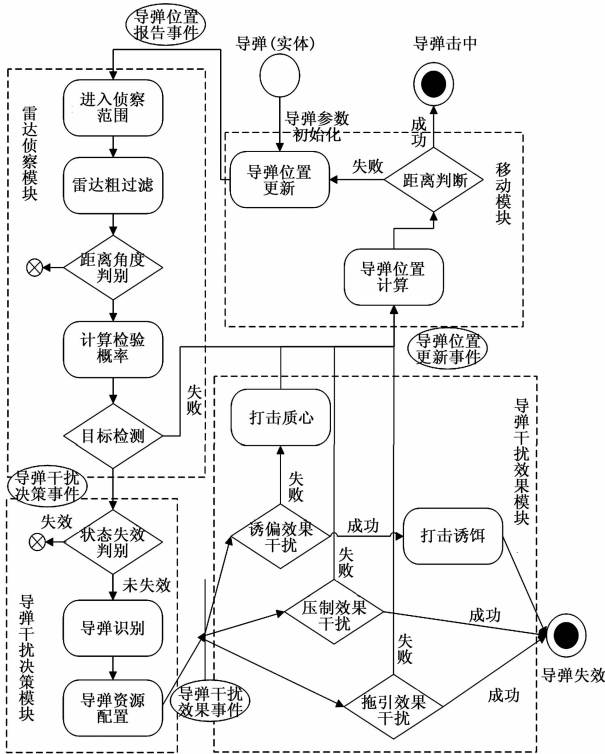


图 4 导弹攻防的事件驱动建模图

Simulation System for Advanced Decision - Making [J]. System Engineering and Electronics, 2016, 38 (6): 1440 - 1449.

[3] Cheng X P, Feng Q I, Wang X. Design of electronic warfare simulation system framework based on semi - autonomous agent [J]. Command Control & Simulation, 2016.

[4] Xu Z F, Wang G L, Jiang F, et al. Research on UML - based modeling of electronic warfare simulation [J]. Command Control & Simulation, 2009.

[5] Yin Q, Duan B, Kang C, et al. Design of energy system and cyber system co - simulation based on HLA/Agent [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016.

[6] Brito A V, Bucher H, Oliveira H, et al. A Distributed Simulation Platform Using HLA for Complex Embedded Systems Design [A]. Distributed Simulation and Real Time Applications [C]. 2015: 195 - 202.

[7] 肖强, 张宏伟, 韩壮志, 等. 机载有源自卫干扰下雷达探测效能仿真 [J]. 计算机系统应用, 2014, 23 (11): 186 - 191.

[8] Xiao Q, Zhang H W, Han C Z, et al. Simulation of radar detection efficiency under airborne active self - defense interference [J]. Computer System Application, 2014, 23 (11): 186 - 191.

[9] 曾益君, 万华. 电子干扰条件下的预警雷达功能仿真 [J]. 雷达科学与技术, 2010, 08 (4): 296 - 300.

[10] Zeng Y J, Wan H. Simulation of early warning Radar Function under Electronic Disturbance [J]. Radar Science and Technology, 2010; 08 (4): 296 - 300.

[11] 王国胜, 戚宗锋, 徐享忠. 预警机雷达电子对抗系统作战效能仿真分析 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2014; 28 (6): 76 - 81.

[12] Wang G S, Qi Z F, Xu X Z. Simulation and Analysis of Combat Effectiveness of Electronic Countermeasure System for Early Warning Vehicle Radar [J]. Journal of Armored Force Engineering College, 2014; 28 (6): 76 - 81.

[13] 齐照辉, 张为华, 范玉珠. 预警雷达对弹道导弹目标的检测概率计算 [J]. 计算机仿真, 2006 (11): 34 - 36.

[14] Qi Z G, Zhang W H, Fan Y Z. Detection probability of early warning radar for ballistic missile targets [J]. Computer Simulation, 2006 (11): 34 - 36.

[15] 李娟, 石春和, 闫云斌, 等. 干扰条件下警戒雷达功能仿真研究 [J]. 现代电子技术, 2009; 32 (7): 38 - 40.

[16] Research on Guard Radar Function Simulation under Disturbance Conditions [J]. Modern Electronics Technology, 2009, 32 (7): 38 - 40.

[17] 王连贵, 王旭东, 潘明海. 机群联合干扰条件下机载雷达探测性能仿真. 航空兵器, 2013 (5): 52 - 57.

[18] Wang L G, Wang X D, Pan M H. Simulation of airborne radar detection performance under cluster interference condition [J]. Aviation Weapons, 2013 (5): 52 - 57.

[19] 谈亮, 杜义, 许大琴, 等. 远距离干扰下的被动侦察雷达功能仿真 [J]. 火力与指挥控制, 2010, 35 (11): 58 - 60.

[20] Tan L, Du Y, Xu D Q, et al. Simulation of passive reconnaissance radar function under long distance Interference [J]. Fire and Command Control, 2010, 35 (11): 58 - 60.

[21] 迟鹏, 杨修涛, 侯宝存. 一种离散事件建模仿真语言系统研究 [J]. 系统仿真学报, 2015, 27 (9): 2015 - 2024.

[22] Chi P, Yang X T, Hou B C. A discrete event modeling and simulation language system [J]. Journal of System Simulation, 2015, 27 (9): 2015 - 2024.

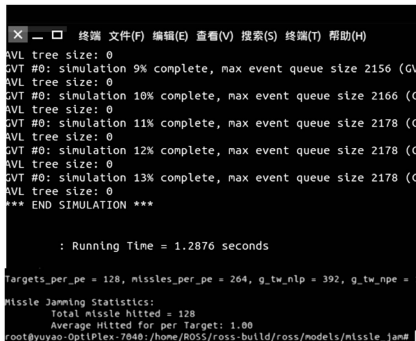


图 5 ROSS 仿真结果报告图

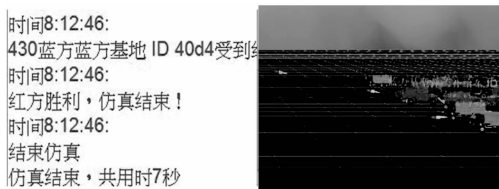


图 6 agent 仿真结果及仿真过程图

研究, 并取得很好的效果, 体现了研究的价值与应用前景, 为任务级雷达对抗分析仿真研究提供了思路, 但仿真系统的模块还不够合理准确, 适应场景还很有限, 需要在下一步研究中继续完善。

参考文献:

[1] 杨妹, 杨山亮, 许霄, 等. 面向高层辅助决策的作战分析仿真系统框架. 系统工程与电子技术, 2016; 38 (6): 1440 - 1449.

[2] Yang M, Yang S L, Xu X, et al. Framework for Combat Analysis

[11] 王国胜, 戚宗锋, 徐享忠. 预警机雷达电子对抗系统作战效能仿真分析 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2014; 28 (6): 76 - 81.

[12] Wang G S, Qi Z F, Xu X Z. Simulation and Analysis of Combat Effectiveness of Electronic Countermeasure System for Early Warning Vehicle Radar [J]. Journal of Armored Force Engineering College, 2014; 28 (6): 76 - 81.

[13] 齐照辉, 张为华, 范玉珠. 预警雷达对弹道导弹目标的检测概率计算 [J]. 计算机仿真, 2006 (11): 34 - 36.

[14] Qi Z G, Zhang W H, Fan Y Z. Detection probability of early warning radar for ballistic missile targets [J]. Computer Simulation, 2006 (11): 34 - 36.

[15] 李娟, 石春和, 闫云斌, 等. 干扰条件下警戒雷达功能仿真研究 [J]. 现代电子技术, 2009; 32 (7): 38 - 40.

[16] Research on Guard Radar Function Simulation under Disturbance Conditions [J]. Modern Electronics Technology, 2009, 32 (7): 38 - 40.

[17] 王连贵, 王旭东, 潘明海. 机群联合干扰条件下机载雷达探测性能仿真. 航空兵器, 2013 (5): 52 - 57.

[18] Wang L G, Wang X D, Pan M H. Simulation of airborne radar detection performance under cluster interference condition [J]. Aviation Weapons, 2013 (5): 52 - 57.

[19] 谈亮, 杜义, 许大琴, 等. 远距离干扰下的被动侦察雷达功能仿真 [J]. 火力与指挥控制, 2010, 35 (11): 58 - 60.

[20] Tan L, Du Y, Xu D Q, et al. Simulation of passive reconnaissance radar function under long distance Interference [J]. Fire and Command Control, 2010, 35 (11): 58 - 60.

[21] 迟鹏, 杨修涛, 侯宝存. 一种离散事件建模仿真语言系统研究 [J]. 系统仿真学报, 2015, 27 (9): 2015 - 2024.

[22] Chi P, Yang X T, Hou B C. A discrete event modeling and simulation language system [J]. Journal of System Simulation, 2015, 27 (9): 2015 - 2024.