

文章编号: 1001 - 2486(2011)03 - 0157 - 07

## 舰艇编队导弹航路规划仿真系统设计与实现<sup>\*</sup>

刘 钢, 老松杨, 谭东风, 侯绿林

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**通过分析火力分配、区域划分、航路规划三者的关系,提出了舰艇编队导弹航路规划三位一体战术决策的思想。设计了一个以此为背景,基于高层体系结构(HLA)的可扩展、开放式仿真体系结构。依据HLA/RTI规范,设计开发了仿真联邦的联邦/仿真对象模型。基于系统的离散事件仿真特征,采用事件调度的仿真策略,利用Petri网建立了系统的动态模型,给出了时间管理和联邦成员的实现过程。仿真示例表明,该仿真平台的实现为舰艇编队导弹航路规划战术决策问题提供了一种新的解决方案。

**关键词:**航路规划;建模仿真;高层体系结构;Petri网;舰艇编队;反舰导弹

**中图分类号:**TP391.9;E843 **文献标识码:**A

## Design and Realization of an Anti-ship Missile Path Planning Simulation System for Ship Formation

LIU Gang, LAO Song-yang, TAN Dong-feng, HOU Lu-lin

(College of Information System and Management, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In the analysis of relationship among fire distribution, area division and path planning, the idea of trinity tactical decision of surface ships formation missile path planning (SFMP) is put forward, and an expandable open simulation architecture is designed based on high level architecture HLA. According to HLA/RTI specification, the federation's FOM/SOM was designed and developed. The event schedule was adopted as the simulation strategy because the system has the characteristic of discrete event simulation, the dynamic model of system was established based on Petri net, and time management and the federates' implementation process were introduced. The simulation demo indicates that the realization of this simulation platform provides anew solution for tactical decision problem of SFMP.

**Key words:** path planning; modeling and simulation; high level architecture; petri net; ship formation; anti-ship missile

作为提高反舰导弹作战能力的重要措施,航路规划技术目前正逐渐应用于反舰导弹。如何运用航路规划技术以充分发挥反舰导弹武器的作战效能,已成为目前亟待解决的难、新问题。而水面舰艇以编队作战为其主要作战模式,对航路规划技术运用的研究就必须要以水面舰艇编队为背景来开展。

航路规划技术的应用带来了海上火力机动战理论不断发展,同时也给导弹使用人员带来了许多难、新问题,航路交叉就是其中一个重要的问题。为了解决这个问题,文献[1]提出了单舰导弹航路规划功能区域的概念和编队导弹航路规划(Ship Formation Missile Path Planning, SFMP)区域划分的思想。这种新概念和新思想的提出将给传统基于直航式反舰导弹的作战流程带来巨大影

响,使传统的舰艇导弹攻击的兵力行动、战法运用等发生一系列的改变,从而使整个编队导弹攻击理论体系发生变化。文献[1]基于这个新概念,进一步提出了SFMP的决策过程,确定了火力分配、区域划分、航路规划三种决策的先后顺序。但三者不仅决策模型复杂,而且相互影响,在实际作战中难以操作。

目前,基于高层体系结构(high level architecture, HLA)的分布仿真是仿真发展的主要方向<sup>[2]</sup>。相对于分布交互仿真(Distributed Interactive Simulation, DIS)标准,HLA具有灵活性、可扩充性、网络冗余数据少等优点。本文基于HLA为SFMP搭建一个仿真试验平台,用以研究火力分配、区域划分、航路规划三种决策的交互关系,进而制定相应的作战规则,来指导决策。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2010-12-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70571084, 61074121);国家省部“十一五”科研计划资助项目(513040404-1)

作者简介:刘钢(1983—),男,博士生。

### 1 SFMPP 问题领域分析

文献[1]中提出了单舰导弹航路规划功能区域的概念和 SFMPP 区域划分的思想,建立了模型并且进行了工程实践,检验了模型的准确性和方法的正确性。区域划分是指在确定的火力分配方案基础上,在海图上划定编队内各单舰航路规划椭圆区域,并且根据椭圆区域的重叠情况计算出 SFMPP 区域划分参考线,为各舰确定实际可用的导弹航路规划区域<sup>[1]</sup>。可以看出,区域划分直接决定于火力分配,航路规划直接受制于区域划分。虽然三者在执行程序上具有先后顺序关系,但是前者的决策必须考虑到后者的可操作性,三者之间形成了互相制约、相互耦合的关系。因此, SFMPP 不再是普通意义上的航路规划,还应包括火力分配和区域划分,将三种决策合为一体,形成三位一体的战术决策。图 1 以 UML 活动图的形式给出了 SFMPP 三位一体战术决策过程。

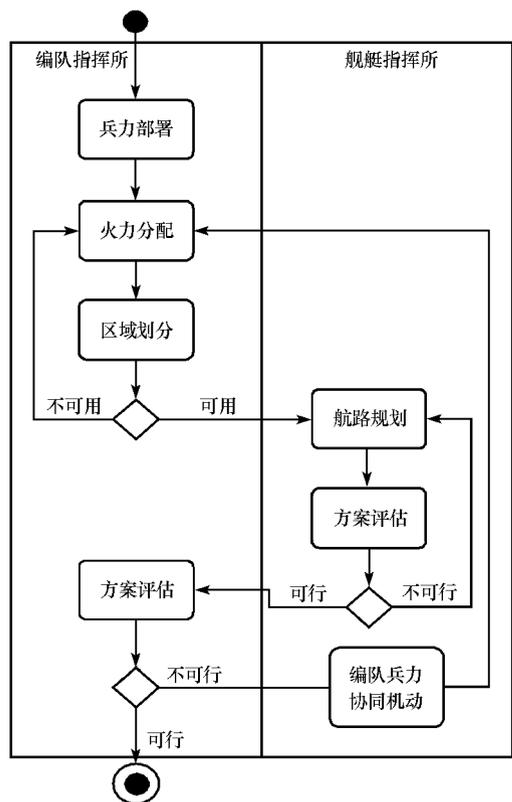


图 1 SFMPP 三位一体战术决策过程

Fig.1 The trinity tactical decision process of SFMPP

图中反映了 SFMPP 过程中主要阶段的先后顺序,其中,编队兵力协同机动的反馈过程体现了兵力机动应服务及服从于整体航路规划的思想。图中可见,编队级和单舰级的两级方案评估是个迭代增量式的过程,驱动火力分配、区域划分和航路规划之间的三位一体动态交互,交互的途径就

是通过编队兵力协同机动。

为了提高 SFMPP 的整体可操作性,在建立三者的解析模型时,必须全面考虑三者的相互影响以及其他影响因素对它们产生的作用,显然这是非常困难的。在三个模型串行组合的情况下,前者的计算结果不一定满足后者的计算条件,并且有些定性因素除非进行一定假设,否则根本无法在模型中体现。这就使得 SFMPP 成为了一个非结构化的问题<sup>[3]</sup>。因此,难以建立一套完整的数学模型对 SFMPP 进行解析分析,也不可能用实际系统进行试验,只有通过仿真,在不同的情况下多次模拟 SFMPP 的过程,以仿真试验数据弥补实际信息不足缺陷<sup>[4]</sup>,从而发现其中的规律,得出的一套约束各个模型的规则,来指导决策。因此,本项研究的仿真属于服务于 SFMPP 三位一体战术决策方案论证的分析型仿真,目的在于为火力分配、区域划分和航路规划提供决策依据。

根据 SFMPP 的功能需求可以确定三个活动者:编队指挥所、舰艇指挥所和导弹武器系统。其用例主要有:兵力部署、火力分配、区域划分、航路规划和方案评估等。其中,按照实施层次的不同,单枚导弹的航路规划又分为航路设计和航路计算。在这里,航路设计是指舰艇指挥员根据战场态势为导弹航路明确实时的约束条件;而航路计算是指导弹武器系统根据实时约束条件和导弹自身的飞行约束条件解算出飞行航路。作者在文献[1]中利用遗传算法为航路计算提供了一种智能技术的决策支持。图 2 所示为 SFMPP 的顶层用例图。

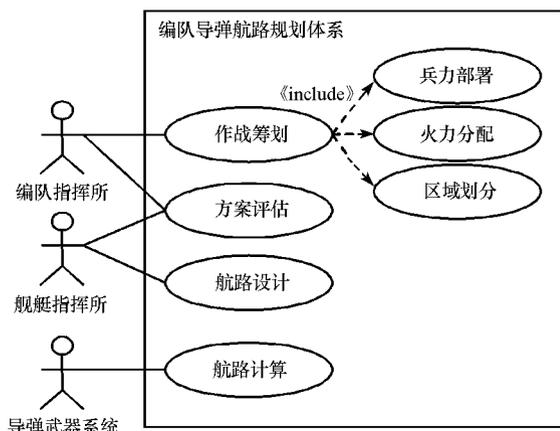


图 2 SFMPP 的顶层用例图

Fig.2 The use-case diagram of SFMPP

## 2 SFMPP 仿真系统的结构组成及其 SOM 描述

### 2.1 仿真系统的结构组成

SFMPP 是一个分布式的系统,又是一个交互的过程,在编队指挥所、舰艇指挥所、导弹武器系统之间存在多种信息的交互,包括状态信息、位置信息和控制信息。尤其在火力分配、区域划分和航路规划三者之间存在着更为复杂的动态交互关系。为了逼真地展现这些关系,仿真系统必须满足分布式和交互的要求。

基于以上要求,SFMPP 仿真系统采用 HLA/RTI 规范<sup>[2]</sup>为核心的技术框架,以仿真资源为核心,从系统仿真的角度对 SFMPP 的过程以及火力分配、区域划分和航路规划三者之间的交互进行仿真。HLA 最重要的两个特点就是支持基于组件(对象)的仿真应用开发模式和将仿真功能与通用的支撑系统相分离的体系结构<sup>[2]</sup>。联邦成员通过调用 RTI 提供的服务进行交互。根据 SFMPP 问题领域分析,参考联邦开发和执行过程模型<sup>[5-6]</sup>,确定 SFMPP 仿真系统的总体逻辑结构如图 3 所示。

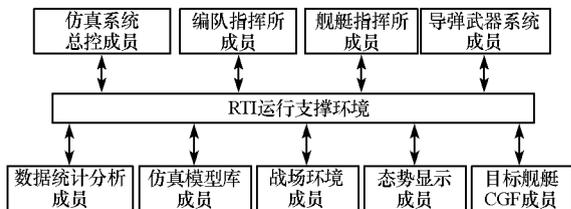


图 3 SFMPP 仿真系统总体逻辑结构

Fig.3 The general logic structure of SFMPP simulation system

### 2.2 仿真联邦的 SOM 描述

仿真对象模型(Simulation Object Model, SOM)是单一联邦成员的对象模型,它描述各个仿真在参与联邦运行时能提供给联邦的数据交换的本质能力。从图 3 可知,SFMPP 仿真联邦包括 9 个联邦成员,各成员功能如下:

仿真系统总控成员主要实现仿真方案管理和系统管理。负责仿真联邦方案数据的初始化及仿真初始设置,负责构建编队舰艇和目标的初始位置状态、设置障碍物的位置。完成联邦运行控制。

编队指挥所成员负责完成火力分配、区域划分,确定导弹的攻击进入方向,针对当前编队级的方案进行实时评估。

舰艇指挥所成员负责仿真本舰艇机动,公布本舰艇的实时位置和状态参数,确定导弹自导作

用距离,进行本舰航路设计,针对当前单舰级的方案进行实时评估。

导弹武器系统成员负责完成航路计算,公布反舰导弹的自身航路约束参数。

目标舰艇 CGF(Computer Generated Forces)成员负责仿真目标舰艇机动,公布目标舰艇的实时位置和状态参数。

仿真模型库成员是系统中各类实体行动多粒度仿真模型集成,实现 SFMPP 过程仿真及方案评估。

数据统计分析成员负责记录仿真运行过程中所有交互的数据及信息,进行数据处理,显示并评估仿真效果,最终目的是发现作战决策规则。

战场作战环境成员主要完成气象环境、电磁环境、海情环境以及障碍物和威胁区的设置。为 SFMPP 提供可设定的复杂仿真实验环境。

态势显示成员基于电子海图实现仿真系统运行过程中的各个子方案以及最终方案的动态显示。包括显示编队舰艇、目标舰艇、障碍物和威胁区的空间几何关系,火力分配方案、单舰导弹航路规划椭圆功能区域及其重叠情况,区域划分方案,以及各枚导弹的最终航路等。

## 3 SFMPP 仿真系统的 FOM/SOM 设计

FOM(Federation Object Model)/SOM 定义了联邦执行和联邦成员的交互数据,是 HLA 应用系统进行数据交互的基础<sup>[7-8]</sup>。开发 FOM/SOM 的过程,实际上是对分布交互仿真系统中的交互数据进行建模和抽象的过程。

HLA 按照面向对象的思想方法来构建仿真系统,而识别出一组概念或对象是面向对象系统分析的核心。统一建模语言(unified modeling language, UML)作为面向对象分析与设计中的一种标准建模工具,能够直接将问题域结构反映到系统模型中<sup>[9-11]</sup>。UML 类图提供系统组件及其相互关系的静态结构描述。可以根据功能需求和问题领域分析,找出 SFMPP 仿真系统中概念性的类及它们之间的相互关系,并确定类的属性和主要操作,以此为基础建立类图(Class Diagram)。图 4 以 UML 类图的形式给出了 SFMPP 仿真系统中的主要类及各个类之间的关系。

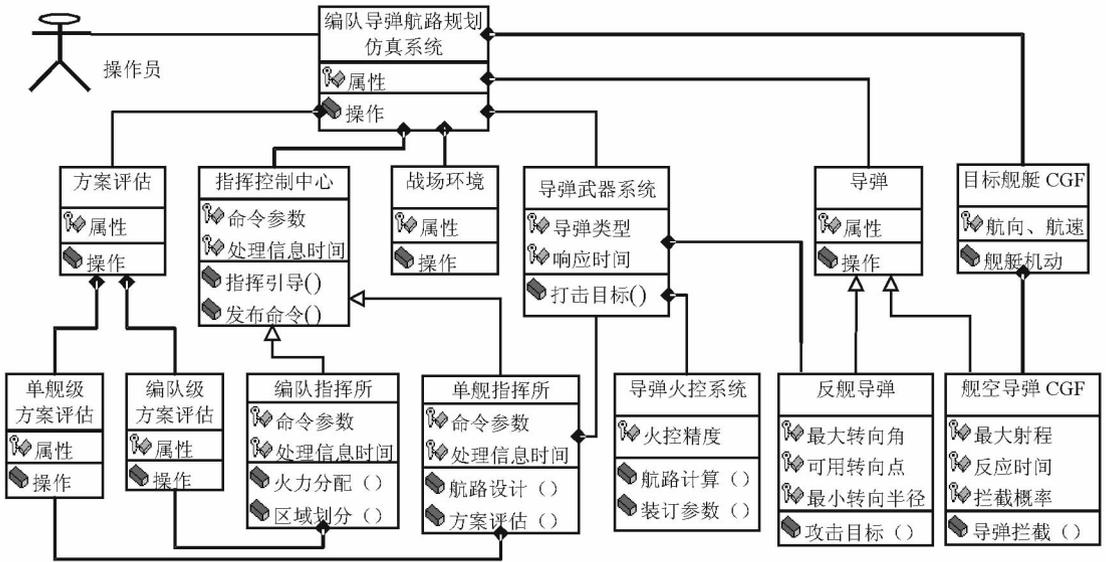


图 4 SFMPP 仿真系统的类图

Fig.4 The class diagram of SFMPP simulation system

上图中已经应用了面向对象技术中的抽象概念。编队指挥所、单舰指挥所都是能够进行指挥控制的实体,因此抽象出指挥控制中心作为这两个类的超类,让它们从指挥控制中心派生。与此类似,反舰导弹、舰空导弹都是执行特定任务的导弹,抽象出导弹这一概念,让具体导弹派生。图中框之间的连线表示类与类之间的关系,实心菱形表示从属关系,空心箭头表示泛化(继承)关系。

在上述分析的基础上,可以确定联邦中的对象类和交互类。表 1 是从 SFMPP 仿真系统的 FOM 设计文档中截取的对象类/交互类结构表。

表 1 SFMPP 仿真系统的 FOM/SOM

Tab.1 The FOM/SOM of SFMPP simulation system

对象类	描述	交互类	描述
AC	系统总控	SetScenario	初始态势设置
FC	编队指挥所	SetTarget	目标态势设置
SC	舰艇指挥所	SetBarrier	障碍物、威胁区设置
MWS	导弹武器系统	DistributeFire	火力分配
TS	目标舰艇	DivideArea	区域划分
STSM	反舰导弹	SelectBearing	攻击进入方向选择
MCS	导弹火控系统	SetSelfguide	自导作用距离设置
CE	战场作战环境	DesignPath	航路设计
STAM	舰空导弹	CalculatePath	航路计算
		PlanPath	单舰航路规划结果
		EvaluScheme_Fom	编队级方案评估
		EvaluScheme_Ship	单舰级方案评估

SOM 的公布(P)和订购(S)关系如表 2 所示。

表 2 SOM 公布和订购关系表

Tab.2 The relationship of publish and subscription of SOM

交互类	SOM		AC		FC		SC		MWS		TS	
	P	S	P	S	P	S	P	S	P	S	P	S
SetScenario	✓				✓			✓				
SetTarget	✓				✓							✓
SetBarrier	✓				✓			✓			✓	
DistributeFire					✓			✓				
DivideArea					✓			✓				
SelectBearing					✓			✓			✓	
SetSelfguide								✓			✓	
DesignPath								✓			✓	
CalculatePath								✓		✓		
EvaluateScheme												
_Ship								✓		✓		
PlanPath								✓		✓		
EvaluateScheme												
_Formation								✓				

## 4 SFMPP 仿真系统的实现

### 4.1 仿真策略和时间管理

联邦运行过程中主要包括如下事件:火力分配、区域划分、航路设计、航路计算和方案评估,具有很强的离散事件仿真特征,对于其他连续事件,通过采样处理并嵌入到相应事件中的方法,可将其转化为离散事件<sup>[12]</sup>,因此,在逻辑上可用离散事件系统建模方法对仿真系统进行描述。而离散事件仿真的核心问题就是仿真策略和时间管理。基于其离散事件仿真特征,采用高效且耗时短的事件调度的仿真策略。事件调度法是一种以事件

发生的时间为主线的仿真策略,它以事件为基本单元,通过定义事件及每个事件发生对模型的影响,按时间顺序确定并执行每个事件发生时有关的逻辑关系,同时策划新的事件来驱动模型的运行。在每一个时间步长内,模型只执行此步长内的事件,在执行这些事件过程中,由于实体状态改变从而引发新的事件产生,再将新的事件加入列表。事件调度法的仿真模型框架如图 5 所示。

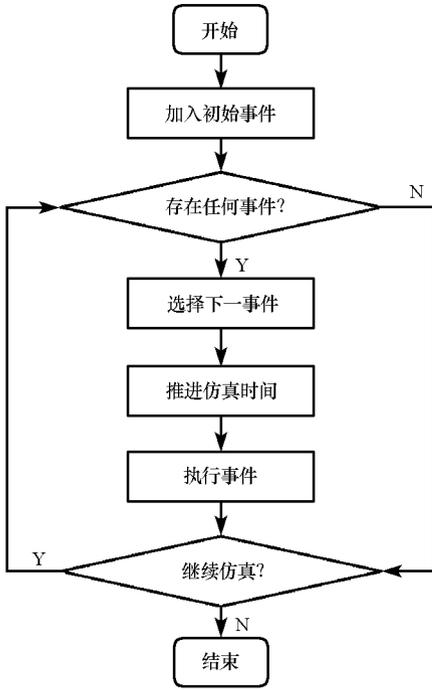


图 5 事件调度法仿真模型框架

Fig.5 The simulation model framework of event schedule method

时间是分布仿真中的核心概念。在 SFMPP 仿真系统中,总控成员、编队指挥所成员、舰艇指挥所成员、导弹武器系统成员、目标舰艇成员、仿真模型库成员和战场环境成员之间在时间推进上是互相影响的,因此,它们采用既“时间控制”又“时间受限”的时间管理策略。它们总是寻求将仿真时间推进到其内部事件队列中的下一个事件的时间。获得时间推进批准后,该联邦成员处理该

时间的所有内部事件。如果内部事件队列中没有任何事件,它们将寻求推进到 RTI 允许的最大仿真时间。例如:舰艇指挥所成员在收到“导弹攻击进入方向”消息后,才能进行“确定导弹自导作用距离”的仿真动作,并且只有当其发送“航路设计”消息给导弹武器系统成员后,后者才能进行自身的仿真动作。对于态势显示成员和数据统计分析成员,它们的时间推进受其他成员的影响而不影响其他成员的时间推进,因此设为仅“时间受限”。它们以相等的步长推进仿真时间,在每个时间步上都使用最后收到的位置值和其他属性值来更新显示。

联邦中成员的逻辑时间推进是在 RTI 的协调下完成的,采用协商的基于步长的时间推进方式。各个联邦成员的逻辑时间是以时间步长为单位向前推进的,在推进过程中联邦成员将收到并处理所有时间戳值在下一时间点(当前时间 + 时间步长)前的 TSO 事件以及所有的 RO 事件,且联邦成员在时间推进完成前不能发送新的事件。对于消息传递机制,考虑到系统运行时需要传递的消息多,并且少量消息的丢失不会对仿真结果产生太大的影响,为了减小传输时延,采用“快速”方式。另外,“时戳”顺序保证所有消息有序传递到成员。

### 4.2 模型的建立

仿真策略仅仅明确了仿真模型的算法,还需进行仿真模型的详细设计。离散事件系统的本质是事件的发生和状态的变化,可从事件与状态的观点对其进行建模。Petri 网是描述和分析离散事件动态系统的主要建模工具。事件和状态分别可用 Petri 网中的库所和变迁来描述,Petri 网的库所和变迁说明如表 3、表 4 所示。而事件的发生和状态的变化则可用 Petri 网系统运行来体现<sup>[13]</sup>。图 6 给出了 SFMPP 的 Petri 网模型。如果在此 Petri 网模型的执行过程中增加数据跟踪与收集等活动,则可实现实际系统的仿真。

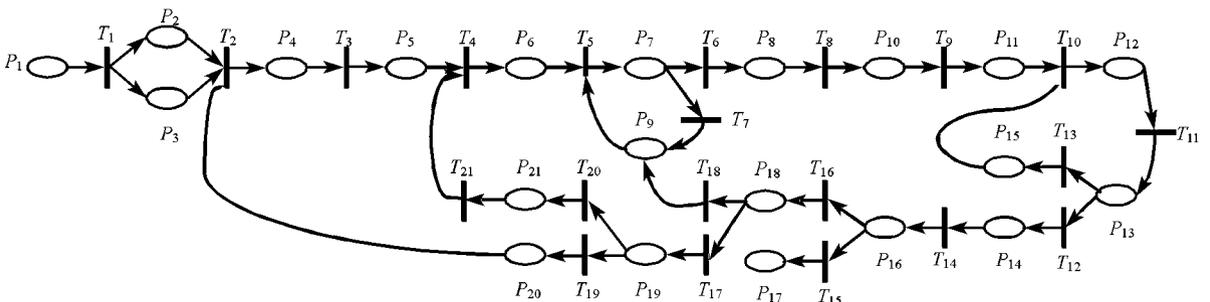


图 6 SFMPP 的 Petri 网模型

Fig.6 The Petri net model of SFMPP

表 3 SFMPP Petri 网的库所说明

Tab.3 The place instruction of Petri net for SFMPP

库所	说明	库所	说明
$P_1$	仿真初始位置	$P_{12}$	进行航路计算
$P_2$	编队舰艇机动	$P_{13}$	单舰级方案评估
$P_3$	目标舰艇机动	$P_{14}$	输出单舰航路规划方案
$P_4$	敌我运动态势绘算	$P_{15}$	重新进行航路设计
$P_5$	推算各舰发射点和目标前置点位置	$P_{16}$	编队级方案评估
$P_6$	进行火力分配	$P_{17}$	输出编队航路规划方案
$P_7$	进行区域划分	$P_{18}$	调整火力运用方案
$P_8$	选择导弹攻击进入方向	$P_{19}$	作战反应时间判断
$P_9$	重新进行火力分配	$P_{20}$	编队兵力协同机动
$P_{10}$	选择自导作用距离	$P_{21}$	采取分批次攻击方式
$P_{11}$	单舰导弹航路设计		

表 4 SFMPP Petri 网的变迁说明

Tab.4 The transition instruction of Petri net for SFMPP

变迁	说明	变迁	说明
$T_1$	仿真开始	$T_{12}$	单舰航路规划方案可行
$T_2$	获取目标运动信息	$T_{13}$	单舰航路规划方案不可行
$T_3$	上级通报饱和和攻击时间	$T_{14}$	开始编队级方案评估
$T_4$	各舰明确发射点和目标前置点位置	$T_{15}$	编队航路规划方案可行
$T_5$	开始进行区域划分	$T_{16}$	编队航路规划方案不可行
$T_6$	区域划分结果可用	$T_{17}$	多次调整火力运用方案都不符合作战意图
$T_7$	区域划分结果不可用	$T_{18}$	改变火力运用方式
$T_8$	确定导弹攻击进入方向	$T_{19}$	作战反应时间充足
$T_9$	确定自导作用距离	$T_{20}$	作战反应时间不足
$T_{10}$	开始航路计算	$T_{21}$	开始局部目标和火力分配
$T_{11}$	输出航路计算结果		

### 4.3 联邦成员的实现

联邦成员模型主要包括三个部分:实体模型、交互模型和运行逻辑。实体模型直接描述实体自身的行为特征,可以运用传统的连续系统和离散事件系统仿真方法建立实体模型;交互模型描述 FOM/SOM 表中各实体间的交互作用,按照 HLA/RTI 的接口规范进行说明;主执行逻辑相当于程序当中的 main 函数,是实体模型的执行体。这三部分有机地结合在一起,组成一个联邦成员,完成特定的仿真任务<sup>[14]</sup>。

以导弹武器系统联邦成员为例,其模型的简化逻辑描述如图 7 所示<sup>[14-15]</sup>。其中的 Tick 函数处理 RTI 事件,直至允许时间推进为止。

导弹武器系统通过调用提供的 RTI 的标准服

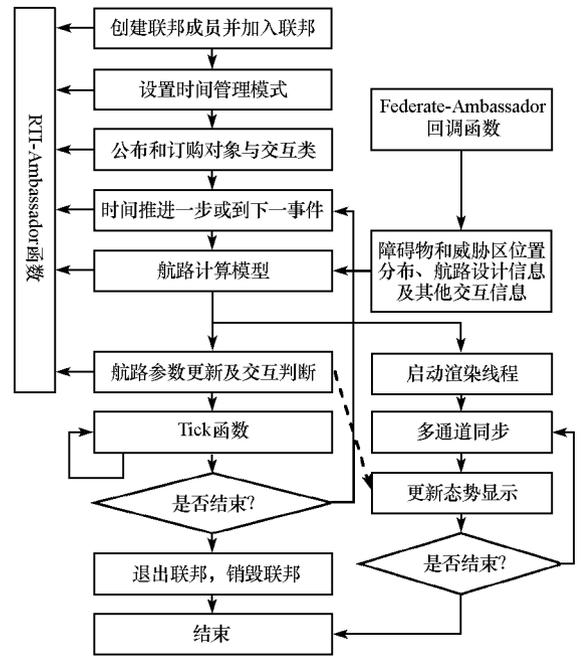


图 7 导弹武器系统联邦成员仿真逻辑流程

Fig.7 The simulation logical flow of missile weapon system federate

务 RTI-Ambassador, 完成加入联邦、设置时间管理模式、发布和预定对象类和交互类、进行时间推进等工作,它的主要实体特征通过航路计算模型程序来描述实现。它通过调用 RTI-Ambassador 来更新反舰导弹对象类的数据,在特定的时刻发送如 CalculatePath 交互类信息。同时,RTI 又通过回调 Federate-Ambassador 的接口将导弹武器系统联邦成员订购的其他属性传递给导弹武器系统联邦成员。其中公布和订购的对象类和交互类属性如表 1 所示。自身的行为特征和与其他成员间的信息交互按照一定的逻辑运行,构成了该联邦成员的仿真模型。

在虚拟现实环境下的联邦成员的实现中,采用多线程技术。首先,由于本系统是基于 Windows 的操作系统,采用双线程结构,一个是 MFC 的窗口线程,主要管理用户和界面的交互;另一个是仿真线程,实现所需的仿真过程。其次,态势显示系统作为仿真系统的一个联邦成员,与其他联邦成员是分布运行的,在运行时采用多线程的方式,除了应用程序的主线程之外,还包括 RTI 线程和视景渲染线程,各线程间的数据是同步的。

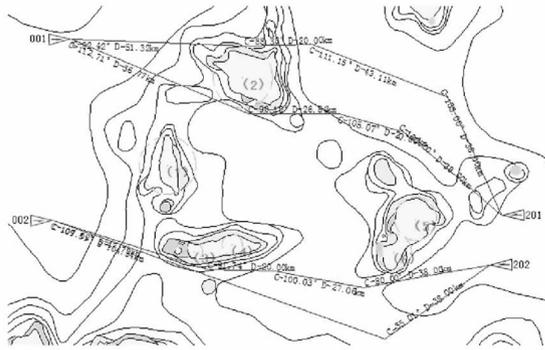
### 4.4 仿真示例

SFMPP 仿真系统的模型库中主要包括火力分配、区域划分和航路规划三个解析模型。作者在文献[16]和[1]中利用遗传算法分别实现了编队导弹火力分配和航路规划,在文献[17]中建立了

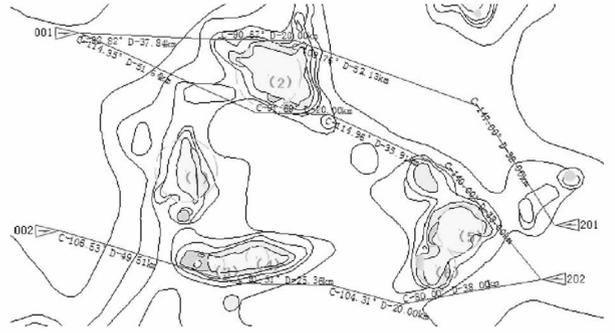
SFMPP 区域划分的模型并进行了编程实现。三个模型的串行组合方案能为指挥员试探性地解决 SFMPP 问题提供试验平台。

在建立的 SFMPP 仿真平台上,我们以某两型舰艇为例对一定战场态势下 SFMPP 的全过程进行了仿真实验。仿真结果如图 8 所示。图 8(a)所

示为红方舰艇 001 和 002 分别对蓝方舰艇 201 和 202 各发射两枚导弹实施多方向同步饱和和攻击时的航路规划方案。图 8(b)所示为无法达成饱和和攻击转而采取分批次异步攻击方式时的航路规划方案。



(a) 多方向同步饱和和攻击时的航路规划方案



(b) 分批次异步攻击时的航路规划方案

图 8 SFMPP 方案示意图  
Fig.8 The scheme of SFMPP

## 5 结束语

SFMPP 作战过程涉及因素多,单纯理论分析难以满足实际作战效能研究和战法研究的需求。为此,本文提出了基于 HLA 的 SFMPP 仿真系统设计方案,并在 Windows2000 操作系统下,采用 Visual C++ 6.0 面向对象的可视化编程语言,实现了 SFMPP 仿真联邦。SFMPP 仿真系统是一个由各联邦成员和 RTI 共同构成的开放的分布式仿真系统,整个系统具有可扩展性,它的实现为 SFMPP 的作战训练、战术应用论证和装备发展提供了技术途径和试验平台,从而为火力分配、区域划分和航路规划的三位一体交互决策以及 SFMPP 决策支持系统的设计开发提供依据。

## 参考文献:

- [1] 刘钢,周智超,徐清华.基于舰艇编队的反舰导弹航路规划[J].电光与控制,2009,16(2):11-17.
- [2] 张卫,张童,查亚兵.基于 HLA 分布式仿真的 Web 服务化[J].国防科技大学学报,2008,30(5):120-124.
- [3] 刘钢,周智超,陈文伟.水面舰艇编队导弹航路规划决策支持系统设计[C]//火力与指挥控制研究会 2008 年学术年会,2008:136-139.
- [4] 张学锋,徐国雄,方木云,等.防空火箭武器仿真系统的设计与实现[J].系统工程与电子技术,2010,32(3):589-591.
- [5] IEEE 1516.3. IEEE Recommended Practice for High Level Architecture Federation Development and Execution Process[S]. New York: Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc, 2003.
- [6] 唐见兵,焦鹏,查亚兵,等.基于 BOM 的 HLA 仿真系统可信

- 性研究[J].国防科技大学学报,2008,30(5):131-134.
- [7] IEEE 1516.2. IEEE Standard for Modeling and Simulation High Level Architecture Object Model Template [S]. New York: Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc, 2000.
- [8] 梁彦刚,唐国金,雍恩米.基于 HLA 导弹攻防仿真系统分析与设计[J].国防科技大学学报,2004,26(5):18-21.
- [9] Whittle J. Formal Approach to System Analysis Using UML: An Overview[J]. Journal of Database Management, 2000, 11(4): 4-13.
- [10] Terry B, Jesse D. Using Objected-oriented and UML Tools for Hardware Design: A Case Study[J]. Systems Engineering, 2003, 6(1): 28-48.
- [11] 李羚玮,陈童,郭波.基于随机服务资源管理对象的装备维修保障系统仿真建模[J].国防科技大学学报,2010,32(2):124-129.
- [12] 朱卫锋,费奇,张金隆.敏捷后勤系统的分布式仿真体系结构[J].系统工程与电子技术,2007,29(2):230-233.
- [13] Hong J E, Bae D H. Software Modeling and Analysis Using a Hierarchical Object-oriented Petri Net [J]. Information Sciences (S0020-0255), 2000, 130(4): 133-164.
- [14] Fernando V, Carlos M. A Generic Rollback Manager for Optimistic HLA Simulations [C]//Proceedings of the Fourth IEEE International Workshop, Distributed Simulation and Real-time Applications. USA: IEEE, 2000, 77-88.
- [15] 甘斌,王建平,林时阳.一种可重用的视景邦元设计与实现[J].计算机仿真,2006,23(4):188-191.
- [16] 尹志伟,刘钢,常国任.基于遗传算法的编队导弹攻击火力分配研究[C]//火力与指挥控制研究会 2007 年学术年会,2007:132-135.
- [17] 刘钢,周智超.基于舰艇编队的反舰导弹航路规划区域划分[J].指挥控制与仿真,2008,30(3):22-27.