

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.09.008

基于 Multi-Agent 的编队对空防御方法

周晶¹, 宋辉¹, 王秀森¹, 李彩霞²

(1. 海军大连舰艇学院模拟训练中心, 辽宁 大连 116018;

2. 中国卫星海上测控部技术部, 江苏 江阴 214431)

摘要: 根据水面舰艇编队对空防御作战特点, 构建基于 Multi-Agent 火力分配优化方案。舰艇编队对空防御是一个双方兵力激烈对抗的过程, 为解决编队防空火力动态分配问题, 采用基于 Multi-Agent 系统对编队防空火力分配策略进行研究。将舰艇抽象为具有适应性的演化 Agent, 在各 Agent 相互协同下不断调整火力分配策略, 最终到达优化目的。与采用静态数学模型的传统遗传算法相比, MAS 更多的考虑各舰艇间协同配合。仿真结果表明: 该方法可为解决火力分配问题提供有效解决方案, 为舰艇对空防御作战目标分配提供参考。

关键词: 对空防御; 人工智能; 多智能体系统; 火力分配

中图分类号: TJ83 **文献标志码:** A

A Method of Formation Air-Defense Based on Multi-Agent System

Zhou Jing¹, Song Hui¹, Wang Xiuse¹, Li Caixia²

(1. Simulation Training Center, Dalian Warship Academy of PLA Navy, Dalian 116018, China;

2. Technology Department, Satellite Maritime Tracking & Controlling Department of China, Jiangyin 214431, China)

Abstract: According to features of Air-defense warfare to surface formation, construct firepower distribution optimization solution based on Multi-Agent system. Air-defense warfare is one of the most important forms in modern naval battles, study on firepower distribution strategy using based on Multi-Agent system to solve firepower dynamic allocation problem. This paper presents a method that abstract surface warship to be an adaptive agent and reach optimization purposes in the end. Compare to the traditional genetic algorithm with static mathematic model, the MAS consider more about all ships' cooperation, coordinating. Simulation result shows that the method can provide an effective scheme for solve firepower distribution problem, and provide reference for air-defense warfare target assignment.

Keywords: air-defense warfare; artificial intelligence; multi-agent system (MAS); firepower assignment

0 引言

对空防御是水面舰艇完成作战任务和保障自身安全的重要作战环节。现代制导武器投入实战的效果表明: 空中目标已成为水面舰艇最大威胁, 防空作战成为水面舰艇的主要作战样式之一。对空防御的本质为: 根据目标的威胁程度与编队防空武器的总体性能, 对防空效果进行预测, 确定出最优的火力分配方案, 使舰艇编队的整体防空效能达到最大。舰艇编队通常由不同型号的水面舰艇组成, 各型舰艇防空火力的技术、战术性能指标不尽相同, 编队应根据各目标的威胁程度、各舰艇防空火力的性能以及打击效果, 确定出最优的火力分配方案, 使舰艇编队的整体作战效能达到最大^[1]。选择合理的火力分配方案是复杂而又重要的战术难题, 火力分配属于典型的非线性整数规划问题。

遗传算法具有全局搜索性强、稳定性好、便于实现等优点, 适合解决此类最优化计算问题^[2]。但传统遗传算法解决此类问题时, 往往通过静态数学模型研究火力分配, 对战场实际环境进行了简化,

忽略了战场各种因素的相互联系与制约。对空防御作战实际上是双方实力的动态对抗, 火力分配不仅需要考虑到双方兵力战技性能指标, 同时需要考虑编队如何展开, 各舰艇协同攻击等^[3]。因此, 笔者基于 Multi-Agent 系统对编队防空火力分配问题进行研究, 在充分考虑双方兵力对抗的前提下研究水面舰艇防空火力分配策略, 同时将水面舰艇抽象为具有适应性的演化 Agent。该类 Agent 能够随着仿真的多次进行, 不断调整火力分配策略, 从而达到优化的目的。

1 问题描述

假设作战海区内共有 n 批空中来袭目标, 我舰艇编队共有 m 个有效防空单元火力进行拦截, 且每个火力单元只能打击一批目标, 每批目标可以分配多个火力单元。

目标分配之前, 各批目标的威胁程度与各火力单元对各批目标的射击有利程度已经过评估和排序。第 j 批目标的威胁程度评估值为 w_j , 第 i 个火力单元对第 j 批目标射击有利程度评估值为 p_{ij} ; 令

收稿日期: 2011-05-06; 修回日期: 2011-06-13

作者简介: 周晶(1981—), 男, 湖北人, 硕士, 讲师, 从事作战仿真模拟器开发研究。

各火力单元对各批目标进行拦击的效益值 $c_{ij}=w_j p_{ij}$; c_{ij} 表示对某批目标进行拦击我方获益大小程度。根据问题描述建立目标分配数学模型, 最优毁伤目标数的数学期望 Z 为:

$$Z = \max \sum_{i=1}^m \left(1 - \prod_{j=1}^n (1 - p_{ij} x_{ij}) \right)$$

X 为由 x_{ij} 组成的 $n \times m$ 阶矩阵, 其中 $x_{ij} \in (0, 1)$, 表示火力单元对目标的分配方案, 即: $x_{ij}=1$ 表示第 i 个火力单元对第 j 个空中目标攻击; $x_{ij}=0$ 表示第 i 个火力单元不对第 j 个空中目标攻击。同时满足约束条件:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n; \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1, i = 1, 2, \dots, m; \\ |t_{ij} - t_{ik}| \geq t_{zh}, k \neq j \end{cases}$$

其中, 第 1 个约束限制对每一批目标必须分配一个火力单元。第 2 个约束限制分配给每个火力单元的目标批次数不能超过参与分配的目标批次总数。第 3 个约束条件中, t_{ij} 和 t_{ik} 为时间变量, 限制分配给同一火力单元的相邻 2 批目标时间间隔必须大于火力单元的转火时间 (t_{zh})。

2 Multi-Agent 编队防空设计

Agent 是指一类处于特定环境的计算实体或程序, 能够感知周围的环境, 并能够灵活、自主地实现一系列的目的或者解决一系列的问题^[4]。Agent 获取所在环境信息, 获取并融合来自于环境的状态信息和多 Agent 系统内部的信息, 从而能够尽可能准确地判断环境与系统状态, 适应并运行于复杂和不断变化的动态环境^[5]。依据多 Agent 建模思想, 首先将原型系统划分为相对应的 Agent 或对象实体。舰艇具有自主活动能力, 因此将其抽象其为 Agent, 而导弹、火炮等不具备自主能力, 通常抽象为一般对象。

2.1 舰艇 Agent 模型设计

在编队导弹攻击中, 舰艇可能接受其他兵力通报目标信息或者自行探测搜索目标, 然后根据自己的状态(包括弹药数量, 装备损毁等)、作战目标、目标信息等做出相应的决策, 对外界产生影响^[6]。根据上述分析, 建立舰艇 Agent 模型, 如图 1。

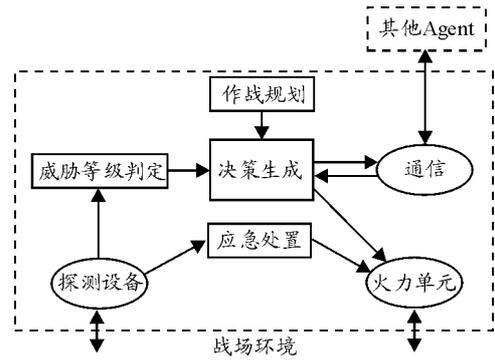


图 1 单舰 Agent 结构

探测模块: Agent(舰艇)通过雷达、激光/红外告警等探测设备感知外界战场环境。

通信模块: 与其它 Agent(舰艇)进行通信, 交换战场信息, 协商任务分配, 实现各 Agent(舰艇)之间的通信交互。

执行模块: 包含火力控制单元与舰艇操纵单元。通过执行模块改变战场态势, 同时也改变自己的内部状态。执行模块动作包括攻击、规避、撤离、占位、加速等战术动作和行为。

决策生成机构: 即 Agent 行为规则库。Agent 决策的核心是对各类基本的作战行为、作战环境、影响因素以及各类行为之间、条件与行为之间相互作用的描述, 以指导 Agent 的行为和决策, 主要以产生式规则表示。

作战规划机构: 单个 Agent(舰艇)根据对空防御需完成的任务, 结合自身当前感知的信息为匹配规则条件, 决策需要考虑到自己的作战任务。

2.2 单个 Agent 的运行

Multi-Agent 系统中 Agent 的适应能力源于自身和其他 Agent 的经验积累, 即机器学习过程^[7]。近年来遗传算法发展迅速, 基于进化机制的遗传学习成为一种新机器学习方法, 它将知识表达为一种符号形式—遗传基因, 通过模拟生物进化过程实现专门领域知识的合理增长型学习^[8]。笔者采用基于遗传算法实现 Agent 进化学习。在前面建立相应的舰艇 Agent 和武备实体模型后, Agent 的演化不断运行, 单个 Agent(舰艇)根据自身和其他 Agent 的行为逐步积累经验, 不断调整自身的火力分配策略, 从而达到 Agent 进化。

2.3 多 Agent 协作

编队对空防御单靠一个火力单元或单条舰艇无法完成任务, 需要集中全部资源、统一配置, 共同完成任务。在多条舰艇构成 Multi-Agent 系统中,

各舰艇装备不尽相同，因此各 Agent 具有不同的探测与防空能力。系统火力分配的目的是将每个目标分配给合适的火力，实现整体执行效果最优。合同网的方式是一种近似全局最优分配方法。负责全局任务分配的 Agent 在合同网中被称作管理者 (manager)，它向其他 Agent 广播任务，接收到任务通知的节点根据任务要求，自己的能力和知识，预期收益等决定是否投标^[9]。

当单舰 Agent 发现一个合适的任务时，向管理 Agent 提交一个投标 (bid)。管理者收到多个投标后，根据各 Agent 能力，对任务通知做出反应，选择最适当的 Agent 来完成任务^[10]。该机制具体执行步骤如下：

- 1) 管理 Agent 将全系统防空任务分解后，通过广播的形式发送给各单舰 Agent；
- 2) 编队各舰 (Agent) 将各自自身防空能力以通信的方式发送给管理 Agent；
- 3) 管理 Agent 通过防空火力分配规则挑选一个适合的舰艇 (Agent) 执行此任务；
- 4) 被选中的舰艇 (Agent) 执行任务，任务能否完成，否则转步骤 5；
- 5) 根据当前舰艇 (Agent) 的任务列表，找出一个单元完成此任务；
- 6) 判断任务分配是否结束，如果分配任务结束则退出循环，否则重新转入步骤 1。

3 仿真及分析

笔者采用 Eclipse 作为 Java 的编译环境，利用新墨西哥州圣塔菲研究所的 Swarm 仿真程序建立测试平台。假设共有来袭空中目标共计 6 个批次，水面编队共有 4 种防空火力，火力单元总数为 10，详见表 1。各火力单元对目标的毁伤概率可依据实验统计数据设定，假设的参数见表 2。

表 1 编队武器配置情况

武器类型 i	单元数量 m_i	武器类型 i	单元数量 m_i
1	2	3	3
2	3	4	2

表 2 武器单元对目标毁伤概率

武器类型 i	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 5	目标 6
1	0.6	0.5	0.8	0.2	0.2	0.6
2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5
3	0.7	0.2	0.2	0.5	0.5	0.4
4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6

一条舰艇同时对 2 个目标进行攻击需要较长时间才能完成，而这段时间内，空中目标极有可能对

舰艇进行攻击，因此仿真中的火力分配策略是尽可能使一艘舰艇攻击一个目标，当该目标消失的前提下才再对其他目标进行火力分配。根据来袭目标多属性分析以及总效用评估，最终 Multi-Agent 系统决策方案详见表 3。

表 3 火力分配方案

目标	火力单元	目标	火力单元	目标	火力单元
目标 1	1, 3	目标 3	1, 2	目标 5	3, 4
目标 2	2	目标 4	3	目标 6	2, 4

由于防空火力受到射程、探测系统有效范围等因素的制约，各武器系统对目标的毁伤概率随着目标动态信息 (如目标脱离武器的有效火力覆盖范围、目标被击落、目标消失等) 发生变化。因此，当战场态势发生变化时，编队对空防御方案也应当适时改变。

4 结束语

笔者就 Multi-Agent 在舰艇编队对空防御的应用进行了探索。仿真实验结果表明：该方法能成功为防空火力分配提供解决方案，对编队防空组织具有一定的参考价值。由于在仿真时对部分模型进行了简化，且忽略了电磁兼容、火力兼容等因素的影响，将在下一步进行重点研究。

参考文献：

- [1] 尹文彬, 许腾, 侯博, 等. 基于遗传算法的舰艇编队火力分配问题研究[J]. 兵工自动化, 2010, 29(5): 4-6.
- [2] 马宏斌, 王玉生. 基于改进型遗传和蚁群混合算法的防空兵群火力分配模型[J]. 兵工自动化, 2007, 26(7): 3-5.
- [3] 王步云, 姜伟, 徐建志. 基于多 Agent 的编队导弹攻击火力分配的优化研究[J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30(2): 45-47.
- [4] 孙增圻, 张再兴, 邓志东. 智能控制理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [5] 史忠植. 智能主体及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [6] 何炎祥, 陈萃萌. Agent 和多 Agent 系统的设计与应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001.
- [7] 刘大有, 杨鳧, 陈建中. Agent 研究现状与发展趋势[J]. 软件学报, 2000, 11(3): 315-321.
- [8] 冯杰. 遗传算法及其在导弹火力分配上的应用[J]. 火力与指挥控制, 2004, 4(2): 3-4.
- [9] 王黎明, 黄厚宽. 一个基于多阶段的多 Agent 多问题协商框架[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(11): 1849-1855.
- [10] 江文峰, 查宇峰. 防空火力抗击效果研究仿真模型设计[J]. 兵工自动化, 2006, 25(6): 16-18.