

doi: 10.7690/bgzd.2016.07.022

基于 MAS 的防空武器协同作战决策研究

郭智杰¹, 糜玉林², 王建国³

(1. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院训练部, 山东 烟台 264001;
3. 海军航空工程学院兵器科学与技术系, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对防空武器协同作战决策效率不足的问题, 提出一种改进的合同网协议方法。根据防空作战实际情况, 建立基于 MAS 的防空武器协同作战体系结构, 给出基于 MAS 的防空武器协同作战策略, 结合要地防空作战实例, 采用 NetLogo 仿真平台对改进前后的合同网模型进行验证分析。仿真结果表明: 改进合同网模型能有效降低武器间通信负载, 缩短武器系统反应时间, 从而提高防空武器协同作战效率。

关键词: MAS; 合同网; 武器协同; 决策; NetLogo

中图分类号: TJ03 **文献标志码:** A

Research on Air Defense Weapon Coordinate Operations Decision-making Based on MAS

Guo Zhijie¹, Mi Yulin², Wang Jianguo³

(1. *Administrant Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China;*
2. *Department of Training, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China;*
3. *Department of Ordnance Science & Technology, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China*)

Abstract: Due to low efficiency problem in air defense weapon coordinate operations, an improved method of CNP was presented. According to reality of air defense operation, the system structure of air defense weapon coordinate operations decision-making based on MAS was established, proposed air defense weapon coordinate operations strategy based on MAS. Combined background of point air defense, a simulation platform named NetLogo was applied to verify and analyze the model. The simulation result shows that the improved model can effectively reduce communication load, reduce the weapon system response time and increase efficiency of air defense weapon coordinate operations.

Keywords: MAS; CNP; weapon coordinate; decision-making; NetLogo

0 引言

武器协同作战是现代军事决策的重要组成部分。多 Agent 技术的出现为武器协同作战决策提供了新的途径。多 Agent 系统 (multiple agent system, MAS) 不仅具有一般分布式系统能资源共享、易于扩展、灵活性强等优点, 而且各个 Agent 之间通过相互协作, 具有很强的自组织能力、学习能力和推理能力, 可以解决大规模的复杂性问题的^[1]。笔者基于 MAS 的分布式环境, 将多 Agent 技术应用于要地防空武器协同作战决策中。在集中指挥方式下, 防空指挥所对其所属的武器平台进行合理有效的统一部署, 武器平台之间通过协同机制快速实现火力分配, 从而提升防空作战的决策效率。

目前多 Agent 分布式决策是人工智能领域研究的一个热点, 合同网模型则在求解此类问题上被广泛应用。笔者运用改进的合同网模型对武器协同作战决策问题进行研究, 在基于 MAS 的分布式环境

下, 利用多主体仿真平台 NetLogo 对提出的武器协同作战决策模型进行仿真试验。

1 合同网模型

1.1 传统合同网模型及不足

合同网协议 (CNP) 由 Davis 和 Smith 在 1980 年提出, 建立在非集中式的市场结构基础上, 解决任务分配的协同过程^[2]。合同网协议基本思想就是通过投标-招标-中标过程进行任务分配^[3]。传统合同网模型的基本流程是:

招标者将待处理的任务集中放置在公共平台上, 并附有任务要求和属性。投标者进行自评, 以投标的方式进行投标。招标者对所有投标者进行评估, 从中选择最优的对象并与之签订合同, 被选中对象进行任务处理工作。传统合同网中的 Agent 可以定义为管理 Agent (manager agent, MA) 和任务 Agent (task agent, TA) 2 类。传统合同网的协商过

收稿日期: 2016-03-27; 修回日期: 2016-05-09

作者简介: 郭智杰(1992—), 男, 福建人, 在读硕士, 从事信息管理与智能决策研究。

程^[4]如图 1 所示。

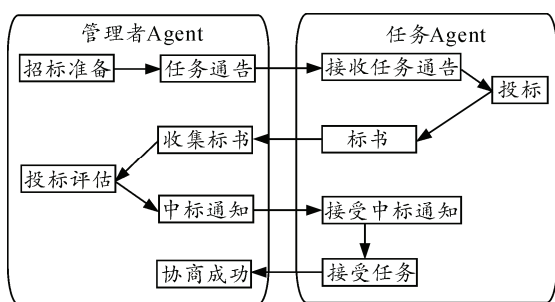


图 1 传统合同网协商过程

分析传统合同网的协同过程可以总结出以下 3 点不足：

1) MA 面向所有的 TA 进行公开招标，需要对每一个投标 TA 的能力进行评估。在选择用于执行任务的 TA 时，还需要与 TA 进行反复地沟通协商，这样做会降低系统的处理效率，也会造成系统资源的浪费。

2) 一般来说，系统环境下的 Agent 都存在自私性，TA 大部分是被动接受任务的。这样的系统合作协同处理问题的效率较低，容易导致系统发生堵塞。

3) 动态适应性差。一方面，单纯考虑 TA 的静态求解能力而忽略了其状态变化会导致执行任务的效果不理想；另一方面，在执行任务过程中可能会出现新的任务需要执行，也可能存在某些 TA 出现故障不能正常或及时完成任务的情况，此时需要修改现有的决策方案重新进行任务协同。

1.2 改进合同网协议

针对传统合同网的不足，这里给出了相应的改进措施：

1) 每一个 MA 都具有一定的记忆性和知识性。通过记忆在知识库里的熟人表可以优先向可以完成任务的 TA 发送招标信息；否则，向其余的 TA 进行招标。

采用这种招标模式可以缩小招标范围，减轻系统工作量，提高效率。为了减少 Agent 间协商带来的负担，在协商未果的情况下，MA 可采取规范^[5]的手段强制进行任务分配，将修订之后的合同发给 TA，TA 执行任务后将结果反馈给 MA。

2) 对于 Agent 的自私性以及接受任务的被动性，引入心智系数^[6]来确定是否投标。利用 Agent 的主动感知特性，感知公共消息黑板上的招标任务，若心智系数无法满足要求则不接受任务；反之，则接受任务。心智系数的使用是为了引入奖惩机制^[7]，

奖励积极响应 MA 招标并且完成任务的 TA；相反，若 TA 多次响应进行投标，但是却未能完成任务，则对其进行惩罚。

3) 针对系统动态性，要定期对 TA 进行评估来更新 MA 知识库，从而更好地挑选 TA 执行任务。为保证任务的执行效率，引入竞拍机制^[8]对任务进行初次的任务分配，对参与投标 TA 给出的“价格”选择执行效果最优的 TA 进行处理。当执行任务过程中出现故障时，采用容错合同^[9]进行二次分配。

以上措施对传统合同网进行了改进，改进合同网协议的决策流程如图 2 所示。

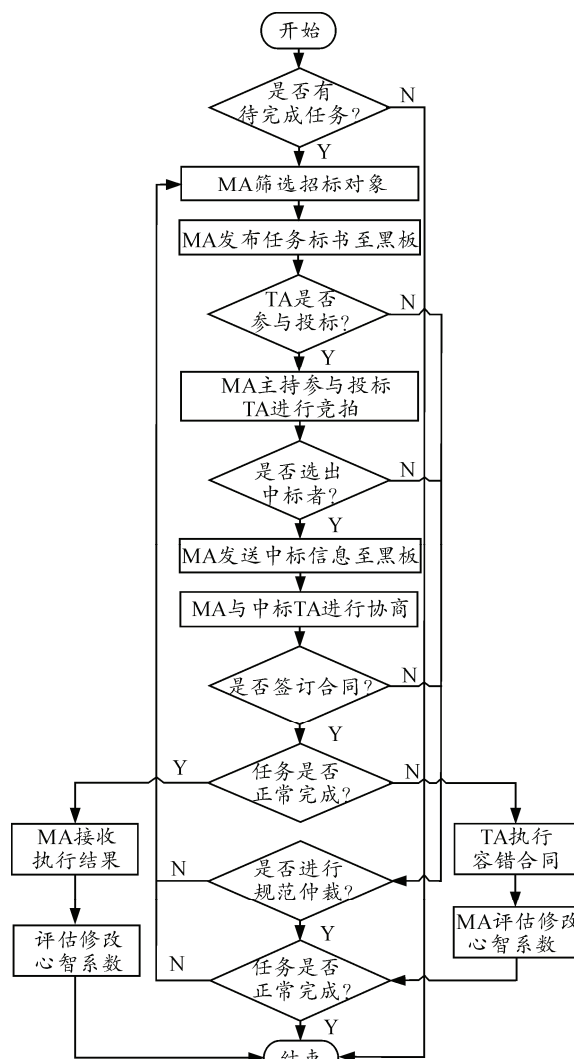


图 2 改进合同网协同决策流程

2 基于 MAS 的防空武器协同作战体系结构

2.1 问题描述

笔者以要地防空作战为背景，结合 MAS 技术对防空武器进行有效的协同。目前我军要地防空作战形势严峻，在防空武器部署方面通常采取弹炮结

合的模式进行阵地配置。要地防空作战中，所有传感器通过组网共享战场态势信息，上级指控中心接收传感器探测的情报信息，经过处理生成作战任务信息并传送给下级指控中心或武器平台，武器平台接收到指令则对目标进行协同打击。为了方便武器协同作战决策体系结构的建立，笔者给出以下假设：

1) 要地防空作战武器平台种类多样，包括陆上机动平台、空中机动平台以及各种带有欺骗干扰性的软武器^[10]。

2) 所有传感器工作均处于理想状态，能够无延时地为武器平台提供目指信息，保证防空武器实现防区外的目标拦截。

3) 指控中心下达给武器平台的任务都是经过任务分解之后所得到的粒度最小的任务，并且各子任务之间是相互独立的。文中主要讨论的是任务间不相关的任务分配^[11]，是对于多目标多武器平台的协同，对于单一来袭目标则无需进行武器协同。

2.2 体系结构

笔者基于 MAS 的武器协同作战决策，定义了 4 类智能体：决策用户智能体 (user agent, UA)、指控智能体 (command agent, CA)、传感器智能体 (sensor agent, SA)、武器智能体 (weapon agent, WA)。基于 MAS 的武器协同作战决策体系结构如图 3 所示。

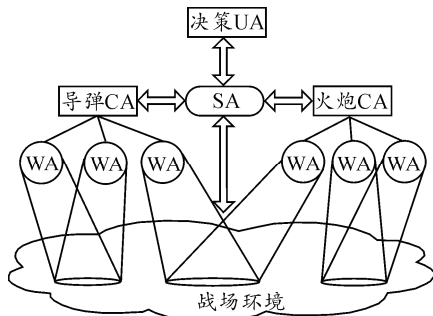


图 3 基于 MAS 的武器协同作战决策体系结构

图 3 中 SA 可以表示防空侦察预警雷达、探测卫星和空中预警机。由 SA 组成的传感器网络探测到敌方来袭目标时，生成战斗警报信息传达给体系里 Agent。此时 UA 负责与指挥决策者进行交互，将决策意图通过 SA 传达给下属的导弹 CA 和火炮 CA，CA 在领受任务之后将任务分解成一系列子任务，同时 CA 通过 SA 感知战场态势。在保证完成 UA 的决策目标基础上，CA 结合自身的情况 (作战武器数量、后勤保障等资源约束) 调配所属的 WA 协同打击目标。WA 在完成作战任务之后，将任务

执行结果报告给 CA，CA 对其进行效能评估并整理成报告反馈给 UA。UA 对此次任务的效果进行最终评估，重新优化部署兵力，再次向下级传达任务，直到战斗彻底结束。

3 基于 MAS 的武器协同作战策略

3.1 策略过程分析

笔者结合改进合同网协同决策模型和武器协同作战决策的体系结构，运用该模型对要地防空武器协同进行决策，指控智能体 CA 负责将决策智能体 UA 下达的任务进行管理和分配，通过广播招标形式寻找武器智能体 WA 执行任务，WA 则负责通过投标形式接收并执行任务，WA 在执行任务的同时接受 CA 的协调，从而基本实现防空武器协同作战。具体的武器协同作战策略如下：

1) 首先定义武器 $W = \{W_i | i = 1, 2, \dots, m\}$ ，任务 $T = \{T_k | k = 1, 2, \dots, n\}$ 招标对象的选择。CA 从知识库里的熟人表里选择可信度高的 WA 进行招标，此时 WA 感知招标信息并对比自身的负载及资源情况，若能完成任务则直接投标签订合同；若熟人表里的所有 WA 都不能完成任务，CA 则面向其余 WA 进行招标。

熟人表里的 WA 都是 CA 根据可信度进行排名的，在选择 WA 时优选考虑信用等级高的 WA 执行任务。可信度大小取决于 CA 对 WA 之前完成任务效果的评价、任务活跃度以及任务友好度。可信度 R 表示如下：

$$R_{ik} = \alpha \times e + \beta \times R_i^z + \gamma \times F_{ik} + \delta \times A_{ik} \quad (1)$$

其中： α 、 β 、 γ 、 δ 是权重系数 $\alpha + \beta + \gamma + \delta = 1$ ； e 表示 CA 对 WA 之前所完成任务的综合评价指标； R_{ik} 表示武器平台 W_i 完成任务 T_k 的可信度； R_i^z 表示 W_i 之前执行 z 个任务 (可能没完成任务) 取得的平均可信度，其中 $z = 0, 1, \dots, n$ ； F_{ik} 表示 CA 与 W_i 的友好值； A_{ik} 表示 W_i 对任务 T_k 的活跃值。计算公式如下：

$$F_{ik} = N_{ik}^z / z; \quad (2)$$

$$A_{ik} = z / N. \quad (3)$$

式中： N_{ik}^z 表示成功完成 W_i 分配的任务数； z 表示 W_i 投标总任务数； N 表示所有 WA 投标的任务数。

这里设置了可信度阈值 R_{min} ，若 $R_{ik} \geq R_{min}$ ，则加

入熟人库，并且向其发出招标通知。

2) 招标。CA 将招标消息和附加的招标任务书发送至公共黑板上，等待 WA 的投标响应。笔者参考一般招标任务书^[12]进行了修改，修改后的招标任务书包含内容如下：

Contract ID 表示标书的唯一标志，用于 WA 识别所要进行投标的任务；Manager ID 表示 CA 的唯一标志，用于管理监督 WA 执行任务；Prohibit 表示禁止参与投标的所有 WA 集合；Task Description 表示所要执行作战任务的描述；Grade 表示任务的等级，大致可分为常规任务、紧急任务；Task Restriction 表示完成任务的时间期限 t_1 、完成任务质量要求 q ；Expire Time 表示投标的截止时间 t_2 ；Executor Restriction 表示对投标 WA 的要求，包含 WA 的可信度 R 、感知度 P 以及 WA 承诺完成任务的能力度 C 。

3) 投标。发出任务招标书后，所有允许参与投标的 WA 开始检查自身是否符合任务标书的要求，决定是否投标。 W_i 的投标期望为：

$$E_{ik} = \omega_1 \times P_{ik} + \omega_2 \times R_{ik} + \omega_3 \times C_{ik} \quad (4)$$

武器 W_i 对第 k 个任务的感知系数 P_{ik} 大小取决于自身资源负载情况以及忙闲程度。 C_{ik} 表示 W_i 承诺完成任务 T_k 的能力度， $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。设置期望阈值 E_{\min} ， E_{\min} 是决策 UA 设置的对应任务的投标期望值，通过 CA 将其传达给各个符合投标的 WA。若目标进入雷达探测范围，则 WA 开始判断目标是否处于武器发射范围，对目标进行识别和威胁判断，同时检查武器是否已被任务分配，综合检查自身是否满足发射条件，计算得出自身的投标期望值 E_{ik} ，若 $E_{ik} \geq E_{\min}$ 则 WA 主动发出投标申请，即通过数据链路传输自身作战信息至 CA；否则，WA 不主动申请投标。若所有允许投标的 WA 都没有主动发出投标申请，此时任务分配可能出于饱和状态或者出现紧急情况无法正常进行任务分配，则此时 CA 进行仲裁规范。仲裁规范的方法如下：

CA 对其发出的任务招标书进行修改，重新发至公共消息黑板。若有 WA 发出投标申请，则准备竞拍工作；若依旧没有 WA 申请，则此时 CA 采取强制形式选择能力最优的 WA，保证任务执行。对于紧急任务的分配，则由决策 UA 进行集中指挥，

把握先打威胁最大，距离目标最近，飞临时间最短的原则进行对空打击。

4) 竞拍。所有投标的 WA 在 CA 的主持下进行竞拍，竞拍机制如下：

假设 W_i 向 CA 发出投标申请，此时 CA 发出竞拍消息至公共黑板，所有发出投标申请的 WA 开始竞标。主持竞拍的 CA 给出竞拍底价 U_{\min} 交由 W_i ， W_i 计算执行该任务所能取得的效能值 U_i 。 $U_{\min} \geq U_i$ ，则将此任务交由其余申请的 WA 继续竞拍； $U_{\min} \leq U_i$ ，则将 U_i 设为新的底价，并继续进行竞拍。若经过一轮竞拍，武器 W_s 以 $U_s \geq U_{\min}$ 的价格拍得任务，则 CA 发出中标消息并与 W_s 协商签订合同；若经过一轮竞拍没有 WA 满足中标条件，则进行仲裁规范。图 4 表示系统内武器竞拍任务的对应关系。

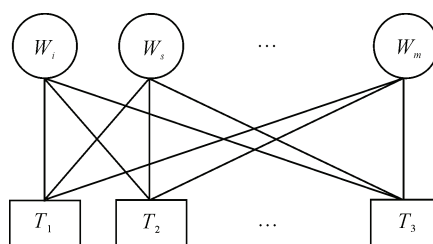


图 4 武器-任务竞拍

5) 中标。假设 W_i 中标，CA 与其进行协商并签订竞拍合同。合同确立后， W_i 开始执行任务，任务顺利完成后将结果反馈给 CA，CA 对结果进行评估，提高 W_i 的心智系数。若 W_i 与 CA 协商未果，则进行仲裁规范；若 W_i 与 CA 协商成功并签订合同，但任务没有顺利完成，即达不到任务要求的 t_1 、 q 值，则 CA 强制 W_i 执行容错合同，并且减弱 W_i 的心智系数。心智系数修改规则如下：

$$C'_{ik} = C_{ik} \pm \varphi \times \Delta c; \quad (5)$$

$$R'_{ik} = R_{ik} \pm \phi \times \Delta r. \quad (6)$$

其中 φ 、 ϕ 是修正系数，引入是为了保持心智系数变化的真实性， $\varphi, \phi \in [0, 1]$ ； Δc 、 Δr 表示变量因子。

6) 签订合同。正常情况下， W_i 与 CA 签订竞拍合同完成任务。但是经过初始协同的系统往往达不到最优效能，甚至会导致武器间发生冲突出现死锁。在要地防空作战中，WA 也可能会因为发生故障或系统出现新任务而无法继续执行现有的任务，这时

就需要执行容错合同。容错合同内容如下：

① 当系统中出现新的任务时，CA 将其打包成任务招标书发送至黑板，并查询系统中闲置的 WA，主持新一轮的竞拍。若系统没有闲置的 WA，则查看新任务的 Grade。若属于紧急任务，则优先调配 WA 执行；若属于常规任务，则考虑系统当前最大效能 U_{max} 不发生较大改变的前提下，合理调配 WA 执行任务

② 当 WA 发生故障或系统出现死锁时，首先考虑启用处于空闲状态的 WA 进行替换，其次考虑优化 W_i 与 T_k 的组合，交换 W_i 执行任务并重新计算系统最大效能 U'_{max} 。 W 与 T 任务交换组合如图 5。

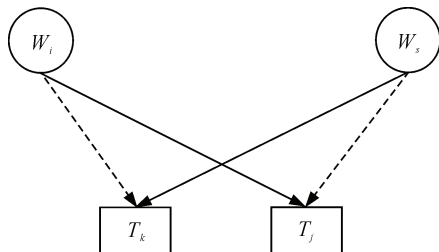


图 5 任务交换组合

7) 流标解约。WA 拒签合同或者未能在规定时间内投标的，CA 宣布任务流标。WA 签订合同后却不能如期保质完成任务的，经过 CA 仲裁规范以及执行容错合同均无效的情况下，此时 CA 宣布解除合同。CA 将未完成的任务重新打包成标书发送至黑板，一方面等待 WA 完成其余任务后申请投标，另一方面若有新的 WA 进入，则与其协商签订合同。

3.2 策略合理性分析

防空武器协同作战过程是一个任务分配的过程，其实质就是一个武器-目标分配(WTA)的问题。对于此类问题的求解方法，目前主要采用马尔科夫决策分析方法以及决策优化算法对作战任务进行分配。此类方法虽然能够基本上解决任务分配的效能寻优问题，但存在实施条件约束，任务分配过程是被动的，只能保证系统局部或者单一任务的效能最大化，而不能做到系统整体的效能最大化；另外，通常任务分配算法的复杂程度较大，计算收敛速度较慢，往往不适用于动态战场环境。相比之下，基于 MAS 的武器协同作战策略则可以针对作战过程中出现的突发情况进行强制性分配和二次分配，通过在初始任务分配阶段引入心智参数以及多 Agent 熟人机制，使得各作战单元在执行任务过程中能够发挥最大限度的自主性，同时也能减少 Agent 之间

交互通信次数，从而提高整体的作战效能；另外，采取该策略可以使得整个任务分配过程适应动态战场环境。在该策略里，引进具有任务等级划分的标书是为了应对在紧急条件下快速进行任务分配，以保证对敌有效的火力压制；加入竞拍机制是为了应对武器动态进入和退出情况下的任务分配；加入容错机制则是为了应对任务分配时出现冲突现象。

经过上述分析可知：与其他任务分配方法相比，该策略提供的任务分配方法更能发挥武器的自主性，更能体现系统任务分配的动态性，更能提高武器协同作战系统的整体效率。

4 仿真实验

4.1 仿真工具

NetLogo 是由美国西北大学和 Computer-Based Modeling 研发的多主体 (Agent) 建模仿真集成环境。NetLogo 的模型库和功能非常强大，尤其适合于随时间变化的复杂系统的建模。相比其他的多 Agent 仿真平台而言，NetLogo 更易于学习操作，人机交互界面更加友好，构建复杂模型的适用性强；因此，笔者采取 NetLogo 仿真平台对武器协同作战决策模型进行验证。具体地讲，NetLogo 有 4 类主体：

Turtles(海龟)：能够在虚拟世界中自由移动的行为主体，不断地与外界发生交互。

Patches(瓦片)：该虚拟世界是由 Patches 组成的二维网格，Patch 是网格中的 1 个方格。

Observer(观察者)：它观察着由 Turtles 和 Patches 构成的世界，对二者进行管理和控制。

Links(链)：是链接 Turtle 与 Turtle 或 Turtle 与 Patches 的主体。

NetLogo 拥有自己的原语和强大的模型库，开发者可以在界面编写自己的程序，通过设置开始 (setup) 和执行 (go) 按钮来运行程序。用户在运行程序过程中可以观察平面或三维视图来了解系统的动态变化。用户还可以设置绘图按钮，用于输出仿真结果进行分析。

4.2 仿真试验及分析

为了验证基于 MAS 的协同作战策略，笔者将其运用于防空作战系统中，采用 NetLogo 平台对其进行仿真，并针对策略里的熟人机制和心智参数机制进行仿真验证。在平台体系中定义 2 类行为主体 weapon 和 airplane，其中 weapon 表示红方部队防空武器，airplane 表示蓝方部队空袭飞机。在接收到防

空警报后, 决策 UA 下达任务至 CA, 此时负责招标的 CA 向熟人库里的 WA 首先发出任务公告, WA 经过评估自身能力后决定向 CA 发出投标申请。在整个防空作战过程中, CA 负责协调各 WA 进行协同作战, 各 WA 之间进行交互协作。内置程序里面分别设置了智能体的效能属性和行为特性, 设置 3 个数据滑动条用于控制作战参数的改变, 分别控制防空武器、作战飞机的数量以及熟人库里的熟人数量。通过改变初始武器、飞机和熟人数量等参数可以仿真不同作战情况武器协同通信负载变化。图 6 所示为武器协同作战决策初始仿真界面。

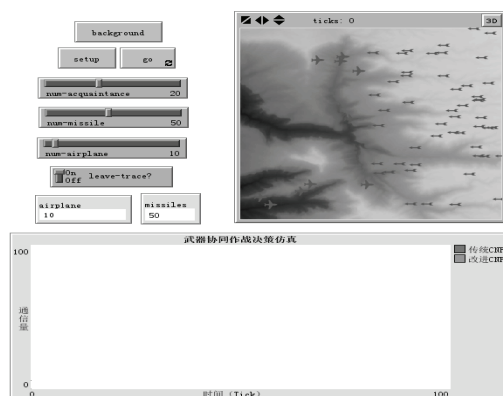


图 6 武器协同作战决策初始仿真界面

图 7 给出了基于传统 CNP 和改进 CNP 的武器协同作战决策仿真结果。

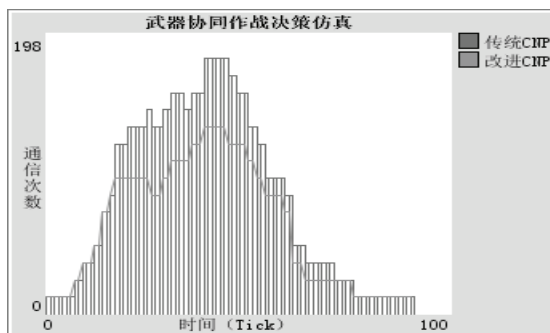


图 7 武器协同作战决策通信量

图 7 中柱形和直线分别表示传统 CNP 和改进 CNP 的通信次数。对仿真结果进行分析可以得出: 一方面, 在防空作战前期由于双方参战数量较多, 武器协同作战决策的通信量随时间增加, 并且随着双方作战资源的消耗发生同步改变, 而在防空作战后期随着空袭目标的减少通信量也随之减少; 另一方面, 由于引进熟人机制和心智参数使得初始招标对象范围缩小, 不仅减少了决策者与武器间的通信次数, 而且减少了武器间的通信负载。由于心智参数的引入使得熟人库内容不断发生变化, 随着系统

的运行逐渐形成熟人关系网, 使系统的动态合作性更好。仿真结果表明: 相较传统 CNP, 改进 CNP 的通信量降低许多, 可以有效缩短防空武器作战反应时间, 提高防空武器协同作战效率。

5 结束语

笔者分析了传统合同网的不足, 针对其不足提出改进的合同网协议, 建立基于 MAS 的武器协同作战体系结构, 提出了基于 MAS 的武器协同作战策略, 并运用仿真平台 NetLogo 对所改进合同网模型里的熟人机制和心智参数变化对协同作战效率的影响效果进行验证。对比分析仿真结果可以看出, 该模型随着系统运行能够形成熟人关系网, 有效减少武器间协同的通信负载。下一步, 笔者将细化容错合同的内容, 深入开展对竞拍和容错机制的仿真建模工作, 通过设置更为详细的作战参数来研究武器动态接入和退出对于防空作战效能的影响。

参考文献:

- [1] Chaib-Draa B, Moulin B. Trends in Distributed Artificial Intelligence[J]. Artificial Intelligence, 1992, 56(6): 35-66.
- [2] Smith R G. The contract net protocol: high-level communication and control in a distributed problem solver[J]. IEEE Trans on Computers, 1980, 29(12): 1104-1113.
- [3] Smith R G, Davis R. Frameworks for cooperation in distributed problem solving[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1981, 11(1): 61-70.
- [4] 王向东, 魏蓉, 王文杰. 基于扩展合同网的多 Agent 协作研究[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(4): 108-112.
- [5] 吴菊华, 吴丽花, 甘勿初. 基于规范的多 agent 协同机制研究[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(5): 1778-1781.
- [6] 高飞燕. 基于扩展合同网的多 Agent 任务分配机制的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
- [7] 刘灵敏. 基于信任度的动态合同网安全模型的研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2009.
- [8] 徐菊香. 动态环境下多智能体系统的任务分配与协作研究[D]. 江苏: 江南大学, 2009.
- [9] 蒋慧超. 具有容错能力的动态合同网研究[D]. 广西: 广西大学, 2009.
- [10] 周丰. 智能指挥控制系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 132-151.
- [11] 吴浩, 刘建勋, 李钦富. 基于 MAS 的分布式作战任务分配研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(4): 435-440.
- [12] 林琳, 刘锋. 基于改进合同网协议的多 Agent 协作模型[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(3): 71-75.