

doi: 10.7690/bgzdh.2023.03.006

基于改进合同网的分布式协同目标分配

赵飞扬¹, 陈洪超², 康林², 王长城¹

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司武器装备信息与控制技术创新中心, 四川 绵阳 621000;
2. 陆装驻广元地区军代室, 四川 广元 628000)

摘要: 针对传统集中式目标分配算法存在的抗毁能力弱、可扩展性差等问题, 提出一种基于改进合同网协议的完全分布式多平台协同目标分配算法。根据作战环境约束、任务约束以及火力平台自身性能约束等一系列约束条件构建目标分配模型; 在目标分配的过程中增加合同交换操作, 提升分配收益。结果表明: 该算法能在提高整体收益的同时, 减少目标分配反应时间, 具备较好可扩展性。

关键词: 改进合同网; 武器-目标分配; 多智能体; 分布式协同; 防空作战

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Distributed Collaborative Target Assignment Based on Improved Contract Net

Zhao Feiyang¹, Chen Hongchao², Kang Lin², Wang Changcheng¹
(1. *Weapon Equipment Information and Control Technology Innovation Center,
Automation Research Institute Co., Ltd. of
China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China;*
2. *Military Representative Office of in Guangyuan District, Army Equipment Department, Guangyuan 628000, China*)

Abstract: Aiming at the problems of weak survivability and poor scalability of traditional centralized target assignment algorithm, a fully distributed multi-platform collaborative target assignment algorithm based on improved contract net protocol is proposed. According to a series of constraints such as operational environment constraints, task constraints and fire platform performance constraints, the target allocation model is constructed. In the process of target allocation, contract exchange operation is added to improve the allocation revenue. The results show that the algorithm can improve the overall revenue, reduce the target allocation response time, and has good scalability.

Keywords: improved contract net; weapon-target assignment; multi-agent; distributed cooperation; air defense combat

0 引言

在防空战场环境中, 武器-目标分配 (weapon target assignment, WTA)^[1]主要是根据受袭单元的价值大小、来袭目标对己方资源的毁伤概率、己方武器的拦截效率等因素遵循一定优化原则、约束条件等设计合适的方案; 从而在目标来袭时, 能够准确及时地按照方案采取相应的措施, 实现最优拦截效果, 提升整体作战效能, 最大限度利用资源。

常见的武器-目标分配求解方法主要包括传统算法、智能算法和混合算法 3 类^[2]。这些算法本质上都属于集中式算法, 即存在一个指挥中心负责所有分配问题。它们在一定条件下可以获得最优解, 但所有信息都需要通过唯一的指挥中心处理, 对通信的依赖大, 不易满足实时性要求, 灵活性较差, 无法应对复杂作战环境下的特殊情况, 指挥中心出现故障会导致全局瘫痪, 可靠性、可维护性、抗干

扰性较差。当前, 随着空袭武器类型不断增多、性能不断提升, 集中式算法存在的问题也逐渐凸显, 已不能满足末端抗击多类型、多批次空袭目标作战需求。

基于合同网的目标分配方法采用分布式信息处理架构, 指挥中心不进行统一的分配, 各平台间相互通信协同分配, 适用于多智能体间的目标分配, 是解决集中式分配中抗毁能力弱、可扩展性差、中心节点故障导致全局瘫痪等问题的有效途径。合同网算法在进行规模大、数量多、复杂度较高的目标分配时, 相比于其他算法有一定的优势。使用传统合同网算法时, 存在容易陷入局部极值的问题, 造成分配不合理, 分配收益较低; 当参与投标的平台过多时, 系统通信量过大, 运行时间长, 分配实时性较差。笔者针对上述问题, 通过增设审核环节、重构评价指标、增加交换操作, 提出一种基于改进合同网的分布式协同目标分配算法。

收稿日期: 2022-11-11; 修回日期: 2022-12-28

作者简介: 赵飞扬(1999—), 女, 山东人, 硕士, 从事智能信息处理与控制研究。E-mail: zfy102899@163.com。

1 合同网基本原理与改进

1.1 合同网基本原理

合同网的概念在1980年由Smith和Davis提出^[3],思想源于人们在商务过程中用于管理商品和服务的合同机制,模拟“招标-投标-中标”的模式,通过多智能体间的相互通信、协商,在寻求个体最优的基础上,得到全局最优或次优^[4]。

传统的合同网算法主要包括以下4个步骤:

1) 任务发布:在平台本身任务序列中,无法完成任务或发现新任务时,作为招标者进行任务发布。

2) 投标:其他平台收到任务信息后,根据任务要求计算自己是否能够完成任务,若能完成,则在有效时间内进行投标。

3) 中标:收到全部投标结果或到达截止时间后,招标者整合投标信息,选择竞标值最高者进行任务执行。

4) 任务执行:招标者与其选择的中标者签订合同,将任务加入中标者的任务序列,进行任务执行,规定时间内返回执行情况。

合同网算法用于分布式求解问题中节点之间的目标分配。节点中任务的发起者和参与者构成合同关系。合同网算法为平台间交互提供了一种有效且具有现实意义的协商机制,得到了广泛应用^[5-11],可以灵活应用不同情形,动态地完成资源分配。

1.2 传统合同网的不足与改进

随着合同网的广泛应用,其应用规模越来越大、场景越来越复杂,传统合同网也会存在很多限制。

问题 1:当参与投标的平台过多时,系统通信量过大,延时长,平台间协商次数多,影响目标分配的实时性,执行效率低。

问题 2:在不考虑平台自身特性和目标状态的情况下,使用单一的评价指标对所有平台进行评价存在片面性和不合理性。

问题 3:传统合同网中仅使用最基本的买卖合同,买卖合同是将任务进行“售卖”,价高者得,容易陷入局部极值。它只适用于规模不大的系统,随着规模不断增大,买卖合同的效率降低。

笔者针对传统合同网算法存在的上述问题,主要开展了以下改进:

1) 在投标前增加资格审核环节,将剩余火力值是否充足和是否存在打击时机作为审核条件,只有火力值充足且在规定时间内能进行目标打击的平台

有资格进行投标。在招标开始前筛选合适的平台进行目标分配,提高执行效率。

2) 重构评价指标,从拦截时间、任务保障和资源代价3方面进行竞价收益计算。尽量保证平台能以预期概率一次毁伤目标,且实际毁伤概率尽量接近预期概率,注意资源消耗代价,尽量减少资源浪费。

3) 增加合同交换操作。在完成买卖合同的基础上,再使用交换合同,交叉比较中标平台和对应目标间的总体竞价收益,取更高者,交换两者初始分配结果,得到更优分配结果。加入交换合同可避免容易陷入局部极值、系统规模过大时买卖合同效率降低的问题。

笔者改进算法目标分配步骤如图1所示。

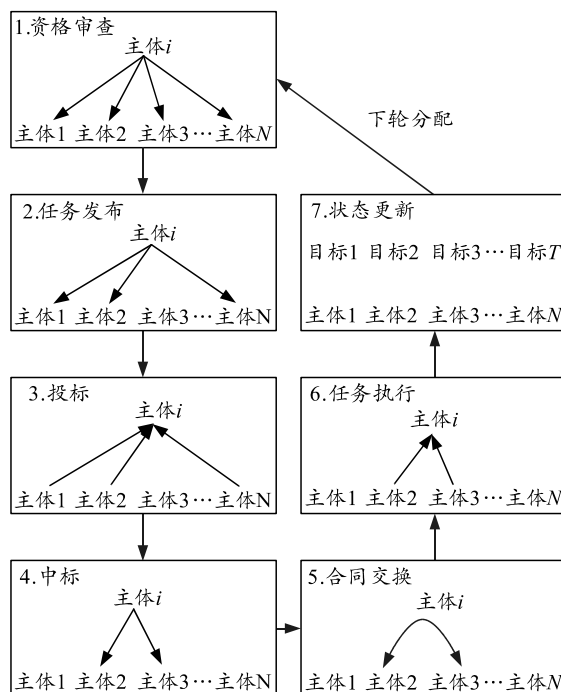


图1 改进算法目标分配步骤

最后,在任务执行后,加入状态更新环节,进行目标和平台状态的更新,以进行新一轮目标分配。若平台在进行状态更新时无响应,则认为该平台已损坏,下轮分配时该平台不再参与分配。

2 基于改进合同网的武器-目标分配算法

2.1 目标分配建模

笔者针对多火力平台、多来袭目标的武器-目标分配问题进行分析。假设当前存在 N 个火力平台、 T 个来袭目标,需要将来袭目标分配给各火力平台进行打击。

火力平台的集合记为 $F=\{F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_N\}$ 。其中 F_i 代表第 i 个火力平台,每个火力平台

可以接收多个来袭目标的信息，进行目标分配。定义平台 i 的属性集合为 $F_i^{sx} = \{F^{Fire}, F^P, F^t\}$ ，其中， F^{Fire} 为平台当前剩余火力值； F^P 为平台对各目标的毁伤概率； F^t 为平台对各目标的拦截时间。

来袭目标的集合记为 $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_j, \dots, Q_T\}$ 。定义目标 j 的属性集合为 $T_j^{sx} = \{T^w, T^{P_{ch}}, T^t\}$ ，其中， T^w 为目标的威胁程度； $T^{P_{ch}}$ 为目标的预期毁伤概率； T^t 为目标的飞临时间。目标的威胁程度通常与目标诸元参数、目标类型、目标火力等级和目标攻击要地的价值等级有关。本次选择目标类型、飞临时间和攻击要地的等级 3 方面威胁度进行加权计算，得到最终的目标威胁度。

构建武器-目标分配的竞价收益矩阵 $C^{N \times T}$ 和竞标单元矩阵 $Z^{N \times T}$ ，当将第 j 个目标分配给第 i 个平台时， $Z_{ij}=1$ ，反之 $Z_{ij}=0$ 。

2.2 目标分配效益函数及约束条件

目标分配的作战收益主要考虑威胁代价、成本代价以及开销代价 3 方面。首先在进行合同分配前，添加约束条件，只有满足条件的平台可以进行投标，有效提高效率，减少成本。判断是否满足火力及时间约束条件，若平台火力不足或拦截时间超出目标飞临时间，则竞价标定为 $-\infty$ ，即不参与本次投标。满足火力及时间约束的平台进行竞价计算，平台出价的竞价公式按分段函数给出，当平台毁伤概率大于目标预期击毁概率时，标定为正值；反之为负值。保证若能一次击毁目标的情况下首先选择击毁目标，但要尽量避免火力浪费，取 $\min\{p-p_{ch}\}$ 。竞价公式如下：

$$C_{ij} = \begin{cases} 100 \times (w/pt) & p \geq p_{ch} \\ -100 \times (w/pt) & p < p_{ch} \end{cases} \quad (1)$$

式中每个平台每次只能分配打击 1 个来袭目标，且需要保证每个可以被打击的目标(存在打击时机)都被分配对应平台进行打击。当 1 次可以击毁目标时，该目标完成分配；当 1 次无法击毁目标时，将更新目标属性，计入下 1 轮再次进行分配，首先将更新目标当前飞临时间，将飞临时间威胁度重新计算后提升目标威胁度值，最后将目标预期毁伤概率进行更新，目标 j 的毁伤概率可按下式进行计算：

$$P_j = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - p_{ij}) Z_{ij} \quad (2)$$

式中： p_{ij} 为平台 i 对目标 j 的毁伤概率； $Z_{ij}=1$ 为将第 j 个目标分配给第 i 个平台，否则 $Z_{ij}=0$ 。则更新

后的目标预期毁伤概率可表示为：

$$P_{ch}^2 = 1 - (1 - P_{ch}) / (1 - P_1) \quad (3)$$

式中： P_1 为目标当前轮次的预期毁伤概率； P_{ch}^2 为该目标在其第 2 轮分配时的预期毁伤概率，依次计算。

2.3 目标分配算法整体流程

如图 2 所示，各平台间相互通信，当发现一批新的来袭目标时，通过“招标-投标-中标-冲突消解-交换-状态更新”的过程完成目标分配。首先使用买卖合同对目标进行初次竞价分配，再对被分配多个目标的平台进行冲突消解，选择最高价目标由该平台执行，其余目标交给未分配打击任务的平台继续分配，直到冲突消解，完成初始分配；接下来使用交换合同，两两一组相互交换进行目标综合收益置换，取整体价格更高的组合进行选择，完成目标分配。将一次性静态分配改为动态分配，若在一次分配打击完成后，进行状态更新，当前目标依然有存活或下次新目标到来时，则更新目标分配需求，再次进行分配。

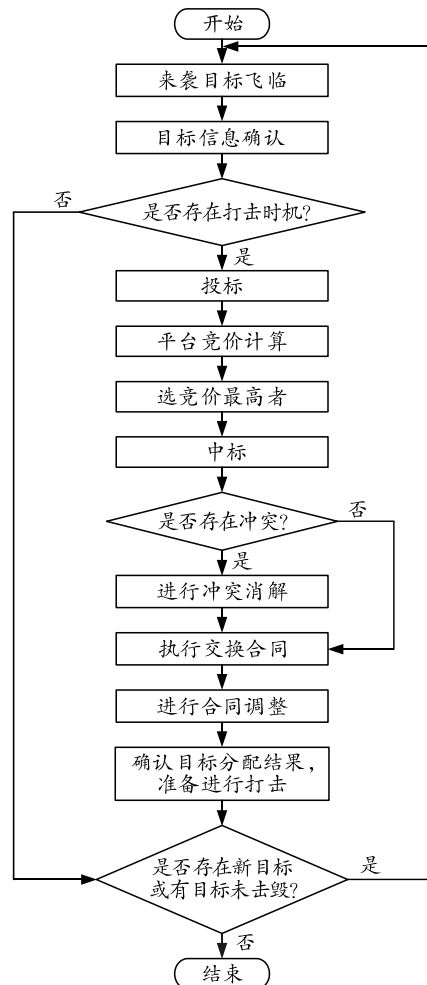


图 2 本文中算法目标分配步骤

3 仿真结果及分析

为验证本文中改进算法在目标分配中的有效性，在 i7 处理器、2.80 GHz 主频、16 GB 内存的计算机上使用 Matlab 平台进行仿真实验，对比传统合同网算法和本文中改进算法的结果。实验分别选用 8 个火力平台、每次 5 个来袭目标，以及 120 个火力平台、每次 100 个来袭目标，进行 50 轮目标分配。

3.1 场景一(8 火力平台、5 来袭目标)

以第 1 轮目标分配为例，各目标属性如表 1 所示，各平台对目标的拦截时间和毁伤概率如表 2—3 所示。

表 1 第 1 轮来袭目标属性

目标	威胁度	飞临时间/s	预期毁伤概率
1	0.812 5	61.32	0.432 5
2	0.613 5	71.45	0.356 9
3	0.484 1	32.54	0.428 8
4	0.514 8	47.89	0.529 1
5	0.477 5	36.77	0.721 6

表 2 各平台对第 1 轮来袭目标拦截时间 s

平台	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 5
1	20.25	45.12	31.73	31.21	31.42
2	31.74	64.12	45.68	41.25	16.58
3	22.99	61.54	23.22	32.54	21.58
4	71.52	14.88	18.71	25.21	41.32
5	31.25	41.52	46.52	47.41	19.77
6	32.41	32.67	28.74	31.54	24.12
7	56.21	52.41	42.53	25.47	61.44
8	38.45	22.10	21.42	42.14	31.25

表 3 各平台对第 1 轮来袭目标毁伤概率值

平台	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 5
1	0.365 1	0.526 1	0.921 1	0.812 3	0.562 1
2	0.312 2	0.312 1	0.398 8	0.412 5	0.557 7
3	0.417 5	0.548 7	0.214 7	0.388 9	0.217 8
4	0.129 4	0.482 4	0.218 9	0.417 5	0.548 7
5	0.641 1	0.512 3	0.541 2	0.378 4	0.952 4
6	0.436 9	0.771 4	0.625 1	0.451 2	0.317 3
7	0.214 7	0.388 9	0.147 8	0.236 9	0.771 4
8	0.512 1	0.214 2	0.119 9	0.615 4	0.132 2

传统合同网算法分配算法按目标威胁度高低进行依次分配，首先对目标 1 进行分配，经过竞价收益计算，平台 6 对目标 1 的竞价收益最高，分配平台 6 进行打击；分配到目标的平台接下来不再参与竞价，记收益为 $-\infty$ ，按目标威胁度高低依次进行分配，最终得到的分配结果为[6, 4, 3, 1, 5]。

笔者改进算法进行分配时，直接一次性计算所有平台对所有目标的竞价收益，并按照竞价收益进行初次分配，分配结果为[6, 4, 6, 1, 5]，存在分配冲突，再经过冲突消解得到分配结果为[6, 4, 3, 1, 5]，最后进行合同交换，提高总体收益，最终得到的分配结果为[6, 4, 1, 3, 5]。

对比传统合同网算法，本文中算法的整体收益从 7.97 提高到 13.24。相较于传统合同网算法对单个来袭目标进行逐次分配，本文中改进算法对一轮中所有来袭目标并行分配，运行时间也略微缩短，运行时间从 1.11×10^{-2} s 变为 0.68×10^{-2} s。

进行 50 轮分配，传统合同网算法和本文中改进算法的运行时间对比如图 3 所示。它们的总体分配收益对比如图 4 所示。其中，运行时间是进行 10 次运行后的平均运行时间。对比传统合同网，本文中改进算法的分配收益提升，且分配反应时间也略微缩短，相较传统合同网算法更有优势。

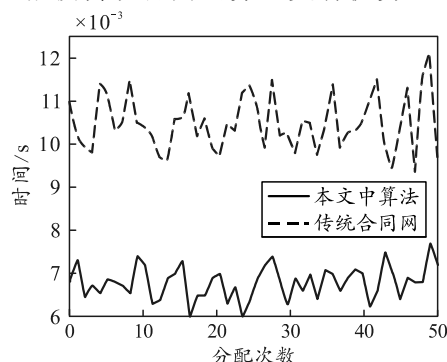


图 3 传统合同网和本文中算法运行时间对比

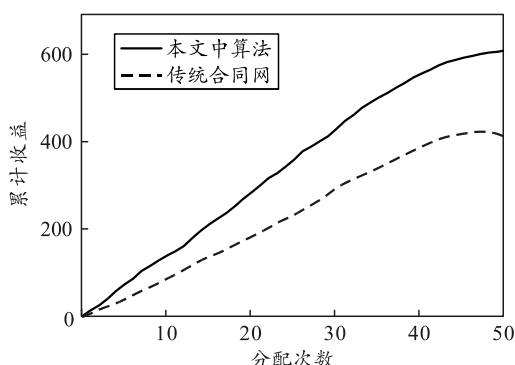


图 4 传统合同网和本文中算法总体运行收益对比

3.2 场景二(120 火力平台、100 来袭目标)

传统合同网算法和本文中改进算法的运行时间对比如图 5 所示，分配收益对比如图 6 所示。

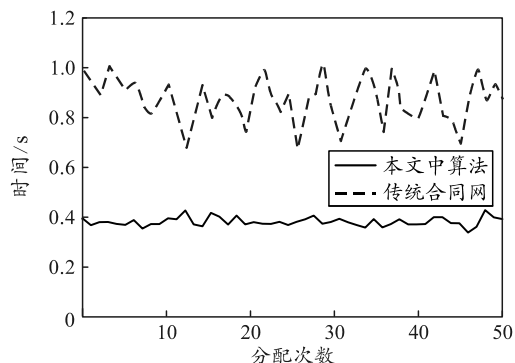


图 5 传统合同网和本文中算法运行时间对比

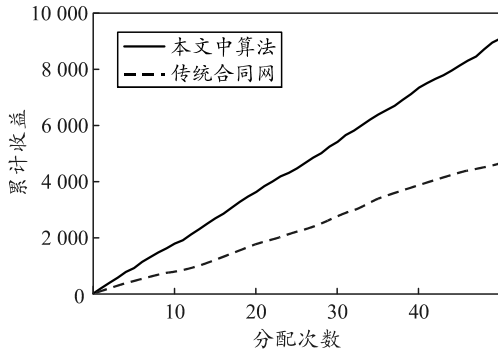


图 6 传统合同网和本文中算法总体运行收益对比

3.3 不同场景结果对比

50 轮分配后，2 种场景的平均运行时间和分配收益对比如表 4 所示。比值计算时使用传统合同网算法数值对比本文中算法数值。

表 4 2 种场景运行时间及分配收益对比

场景	运行时间比	分配收益比
场景一	1.622	0.691
场景二	2.843	0.510

可以看出，当平台和目标数量越多，即分配规模越大时，传统合同网算法与本文中算法的运行时间比增大，分配收益比减小。在大规模系统中，本文中算法在运行时间和整体收益上都有较大优势；但是改进后的算法为并行算法，相较于串行算法，程序所占用的内存空间更大。

4 结论

武器-目标分配问题是火力控制的关键问题之一，分布式目标分配是 1 个重要的技术发展趋势。笔者对传统的合同网算法进行优化，考虑到威胁代价、成本代价以及开销代价等，构建更加符合实际作战需求的目标分配收益模型，在买卖合同的基础上增加交换合同，提高整体收益。仿真结果表明：基于本文中改进算法的目标分配方法比传统合同网算法整体收益更高，同时减少分配时间，更加符合当前协同作战的特点和需求。

改进后算法的空间复杂度升高，占用的内存空

间更大。当目标分配的规模更大时，对计算机硬件性能要求也会更高，且仿真没有考虑到实际中的通信延时、传输延时。接下来，将增加目标及平台数目，扩大目标分配规模，考虑来袭目标动态性等问题，让仿真实验更接近实际战场情况。

参考文献：

- [1] SAHIN M A, LEBLEBICIOGLU K. A standard expert system for weapon target assignment problem[C]//Proc. of the International Symposium on Performance Evaluation of Computer & Telecommunication Systems. IEEE, 2009: 221-224.
- [2] 李勇君, 黄卓, 郭波. 武器-目标分配问题综述[J]. 兵工自动化, 2009, 28(11): 1-4, 9.
- [3] SMITH R G. The contract net protocol. High level communication and control in distributed problem solver[J]. IEEE Transaction on Computers, 1980, 29(12): 1104-1113.
- [4] 郭智杰, 糜玉林, 肖阳, 等. 改进合同网协议在防空武器目标分配中的应用[J]. 现代防御技术, 2017, 45(4): 104-111.
- [5] 骞恒浩, 石鹏飞, 王敏文, 等. 基于改进序列二次规划的非线性控制分配[J]. 兵工自动化, 2022, 41(8): 74-80.
- [6] 邢锐锋, 唐建. PRP 协议在实时测控专网中的初步应用[J]. 兵工自动化, 2023, 42(2): 27-31.
- [7] 张梦颖, 王蒙一, 王晓东, 等. 基于改进合同网的无人机群协同实时任务分配问题研究[J]. 航空兵器, 2019, 26(4): 38-46.
- [8] 廖承城, 陶伟, 刘韬. 基于改进合同网的异构无人机协同对地任务分配[J]. 现代计算机, 2021(15): 100-107.
- [9] 韩松岳, 苗恺, 田春元, 等. 5G 移动通信技术军事应用研究[J]. 兵工自动化, 2022, 41(4): 53-59.
- [10] 李明, 刘玮, 张彦铎. 基于改进合同网协议的多 Agent 动态任务分配[J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 46(2): 51-56, 63.
- [11] 梁志伟, 吴海健. RoboCup 标准平台组中基于改进合同网协议的任务分配算法[J]. 计算机工程与科学, 2022, 44(1): 176-183.