

# 实时分布式武器目标分配的任意时刻求解

吴玲, 卢发兴, 邢昌凤

( 海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033 )

**摘要:** 实时分布式约束优化问题(DCOP)求解中, 要求算法能在给定的截止时间前给出问题的尽量优化的可行解。以分布式武器目标分配这一典型 DCOP 问题求解为例, 给出一种动态实时分布式约束优化问题的任意时刻算法, 能较好响应截止期并给出满意解。通过仿真计算说明了算法在实时性和解质量方面的性能。

**关键词:** 分布式约束优化, 截止期, 任意时刻算法, 分布式武器目标分配

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## 0 引言

复杂的分布式网络越来越多地用于解决大量的实际工程问题, 例如传感器网络探测和跟踪、多机器人协作救援、智能兵力组网作战[1-2]等。这类问题的共同特点是在动态实时分布式环境下, 在复杂的约束条件下, 针对某一目标函数进行优化, 即问题可建模为分布式约束优化问题(Distributed Constraint Optimization Problem, DCOP)[3]。DCOP 是分布式人工智能研究中的基础和热点问题, 常作为多智能体协作问题的重要而有用的抽象, 对实际中的分布式规划、调度、资源分配等问题建模。

DCOP 的有效求解是解决实际问题的关键, 尤其在实时条件下, 求解的完成时间受到截止期的约束, 当问题规模较大时, 如何能找到尽可能优化的解, 并及时响应任务截止期, 值得深入研究。本文以分布式武器目标分配问题为例, 研究利用具有任意时刻特性的 DCOP 算法进行分配问题的实时求解技术。

## 1 分布式武器目标分配问题的 DCOP 模型

### 1.1 DCOP 的一般模型

一般而言, DCOP 模型包含  $n$  个变量  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , 变量有其值域  $x_i \in D_i, (i = 1, 2, \dots, n)$ , 所有变量的值域构成变量域集合  $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ ; 如变量取值是有限, 可令  $D_i = \{v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,d(i)}\}$ , 其中  $v_{i,j}$  是变量  $x_i$  的可能取值;  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$  是定义在变量集  $X$  上的约束集,  $c_i(y_1, y_2, \dots, y_j)$  为定义在变量集的子集上的约束, 其中  $\{y_1, y_2, \dots, y_j\} \subseteq X$ 。问题求解是找到一个变量集的赋值  $X^*$ , 使得优化目标函数  $F(X^*)$  在各种约束条件下实现最小(大)化。

DCOP 中的变量分布在多个智能体中, 每个智能体被分配一个或多个变量并能控制其取值, 每个变量只属于一个智能体。智能体之间通过消息通信和本地任务计算来实现对全局目标的优化。

### 1.2 分布式武器目标分配问题的 DCOP 模型

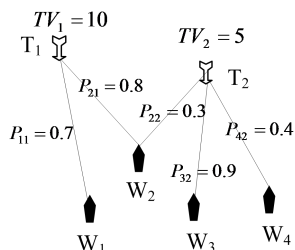


图1 分布式武器拦截来袭目标示意图

武器目标分配是一个备受关注的运筹问题[4]。分布式武器目标分配(distributed weapon-target allocation, DWTA)问题, 是用分布在不同位置的武器拦截目标。每个目标有一定的威胁值, 每座武器对目标有一定的杀伤概率; 要求将所有的武器合理地分配于来袭目标, 以使拦截后对来袭目标总的毁伤最大。分布式条件下,

只能通过武器载体平台之间的通信实现分配。由于武器射击范围有限，每个武器所能拦截的目标集合是所有目标集的子集。假定每座武器只能拦截一批目标，且为了防止火力交叉的情况，某些武器不能同时使用，这是武器使用中的约束条件。如图 1 所示。

DWTA 是一个典型的分布式约束优化问题。由于任何一座武器对目标的发射必须在其射击时间窗（即目标处于武器发射区的时间）内完成，因而这一分配过程又是一个典型的实时过程。

假定武器数量为  $n$ ，来袭目标数量为  $h$ ，令每座武器对应一个变量，其取值为该武器被分配拦截的目标批号或 0（表示该武器未被分配给任何目标），则变量集合为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，其中  $x_i \in D_i \subseteq \{0, 1, 2, \dots, h\}, (i=1, 2, \dots, n)$ 。优化目标是：

$$\max F = \sum_{k=1}^h TV_k [1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{i,k})]$$

其中  $TV_k$  表示第  $k$  个目标的威胁值， $P_{i,k}$  表示用武器  $i$  拦截目标  $k$  时的毁伤概率。实现这一优化目标的约束包括：1) 武器使用兼容性约束：对于某些  $x_i, x_j \in X$ ，要求  $x_i \cdot x_j = 0$ ，即这些武器不能同时使用（假定约束是二元的，即不涉及多于两个变量）；2) 时间约束：要在目标突防之前给出火力分配方案、确定武器射击诸元，并发射武器。

令一座武器对应一个变量，其取值由智能体控制，智能体了解与其变量相关的值域及所有约束。智能体之间通过通信进行消息传递，尝试使优化目标函数得到不断改善。

## 2 实时分配问题的任意时刻 DCOP 算法

DCOP 求解是寻找使目标函数最优化的决策方案，这一问题近年来分布式人工智能研究中的热点问题，吸引了大量学者的关注。目前主流的 DCOP 算法分为两类，一类是对解空间进行完备搜索的全局优化算法，如 Adopt 算法[3]、DPOP 算法[5]等；另一类是进行局部搜索的算法，典型的如分布式随机搜索算法(Distributed Stochastic search Algorithm, DSA) [6]。全局优化算法可以得到最优解，但算法的复杂性使其只能用于求解静态或小规模问题。局部搜索算法不能保证找到问题的最优解，但它们不需要全局控制机制，通信和计算代价小。

实时 DCOP 求解算法必须是一类任意时刻算法，即在计算初期算法能快速产生问题的一个初始可行解，随着计算时间的增加，解的质量不断提高，且算法可以在任意时刻被中断，并输出当前找到的最优可行解。任意时刻算法保证在截止期到来时给出可行解，如图 2 所示。

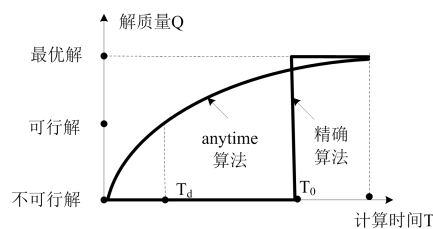


图2 anytime 算法与精确算法的区别示意图

全局优化 DCOP 算法一般不具备 anytime 特性，它们在分布式条件下采用异步协商方式，在找到最终解之前，在局部节点上并不知道迄今得到的最优解是什么，因此也难以确保在截止期到来时能给出迄今为止得到的最优解。局部搜索算法则可以通过对各个智能体状态的合成实现全局解质量的不断改善，使其具有任意时刻特性。一种具有任意时刻特性的 DCOP 求解算法由算法 1 给出。其中，概率  $P(t)$  可以按照 Metropolis 准则设置，即令  $P(t) = \exp[-\frac{(f_{new} - f_{old})}{k_t}]$ ，其中  $k_t$  是按退火规律不断减小的正值。如果变量赋值后目标函数值改善（减小），则  $\text{random}[0,1] < P(t)$  成立，变量赋新值，否则以一定概率赋新值，且这一概率值是随时间增加不断减小的，从而使得算法具备了逃离局部极值的能力。由于每个个体保存了迄今为止得到的最优可行解，因而可在任意时刻被中断并输出问题解，从而具有了任意时刻特性。

算法 1: 动态实时 DCOP 的 anytime DSA 算法 (由每个智能体执行)

- 初始化;
- 从值域中随机选择一个值赋给变量;
- While 没有满足终止条件
  - If 变量被赋新值
    - 发送新状态信息给邻居;
    - 如果新状态值优于本地当前最优值, 更新最优状态信息; End if
    - 收集邻居传来的新状态信息;
    - 如果新状态值优于本地当前最优值, 更新最优状态信息;
    - 从值域中选择新值;
    - If  $\text{random}[0,1] < P(t)$ 
      - 变量赋新值; End If
- End While

### 3 仿真计算

考虑使用 5 座分布在不同位置的武器拦截 4 批目标, 以使对目标总的毁伤最大。假定每个目标仅由一座武器拦截, 且由于使用的兼容性要求, 武器 1 和 3 不能同时使用。目标威胁值及武器对目标拦截概率如表 1 所示, 0 表示目标超出该武器的射界。

表 1 目标威胁值及拦截目标毁伤概率

武器 \ 目标	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
目标威胁值 TV <sub>i</sub>	6	7	8	7
W <sub>1</sub>	0.7	0.8	0	0.5
W <sub>2</sub>	0.6	0	0.9	0.7
W <sub>3</sub>	0	0.4	0.6	0.8
W <sub>4</sub>	0.8	0.5	0.6	0
W <sub>5</sub>	0.4	0.5	0.7	0.6

设定算法的截止时间, 用 DSA 算法和 DPOP 算法分别对问题进行求解, 不同截止时间的武器目标分配结果和作战效能如图 3 所示。

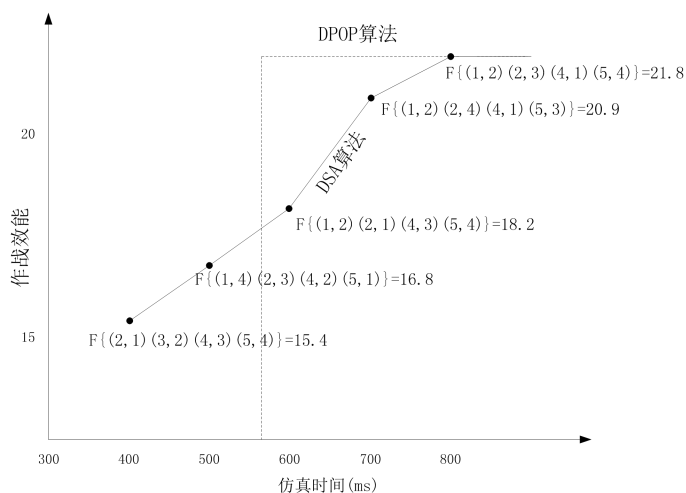


图 3 不同时间下用不同算法求解武器目标分配效果示意图

图 3 中  $F\{(2,1)(3,2)(4,3)(5,4)\} = 15.4$  表示武器 2 对目标 1, 武器 3 对目标 2, 武器 4 对目标 3, 武器 5 对目标 3 进行拦截, 作战效能(对目标的毁伤)为 15.4。由图可知, 算法 DPOP 由于没有 anytime 特性, 当如果给定的任意截止时刻小于其完全计算所需时间 (590ms), 算法不能给出解; 而 DSA 算法具有 anytime 特性, 任意时刻终止都能输出当前解, 解质量随着仿真时间的增加而增加, 并最终得到最优解。DPOP 算法和 DSA 算法最终都得到了最优武器目标分配方案(1,2)(2,3)(4,1)(5,4)。

## 4 结 语

本文在介绍分布式约束优化问题 (DCOP) 的基础上, 建立了分布式武器目标分配问题的 DCOP 模型, 提出一种动态实时分布式约束优化问题的任意时刻算法, 并在实时条件下对典型的分布式武器分配问题进行求解, 仿真结果说明了算法在实时性和解质量方面的性能。

### 参考文献:

- [1] W. Burgard, M. Moorsy, C. Stachniss, F. Schneidery. Coordinated Multi-Robot Exploration. *IEEE Trans. Robot. Automat.* 2005, 21(3):376 - 386.
- [2] 卢发兴, 吴玲, 董银文. 带航路规划的反舰导弹盲目射击攻击模型及性能研究. *电子学报*, Vol. 37, No. 9., pp. 1956-1960, 2009.
- [3] P. Modi, W. Shen, M. Tambe, M. Yokoo. Adopt: asynchronous distributed constraint optimization with quality guarantees. *Artificial Intelligence* 2005, 161:149-180.
- [4] 吴玲, 卢发兴. WTA 问题的截止期定义及 Anytime 算法分析. *武汉理工大学学报*. 32(6):140-143, 2010.
- [5] A. Petcu, B. Faltings. A Scalable Method for Multi-agent Constraint Optimization. In proceedings of IJCAI 05, 2005, 266-271.
- [6] W. Zhang, Z. Xing, G. Wang, and L. Wittenburg. Distributed stochastic search and distributed breakout: properties, comparison and applications to constraints optimization problems in sensor networks. *Artificial Intelligence*, 2005, 161(1-2):55-87.