

基于分布式约束优化的多平台导弹协同航路规划

雷兴明, 邢昌风, 吴 玲, 卢发兴

(海军工程大学电子工程学院, 湖北武汉 430033)

摘 要: 考虑到战场环境存在不同威胁体, 引入改进型 Voronoi 图, 完成了不同威胁集合下导弹可飞航路集的构造; 建立了威胁和燃油模型, 计算得到各段航路的代价. 在此基础上, 针对多导弹航路的总代价最小, 且到达目标的最大时差最小的优化目标, 将多平台导弹航路规划问题建模为分布式约束优化问题, 并利用分布式约束优化算法求解各弹的航路. 针对典型实例进行了仿真, 获得了优化的航路方案, 且计算时间、通信量等指标均表明了模型方法的有效性.

关键词: 多导弹协同; 改进型 Voronoi 图; 协同航路规划; 分布式约束优化问题

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 10-2068-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.10.027

Path Planning for Multi-platform Missiles Based on Distributed Constrained Optimization

LEI Xing-ming, XING Chang-feng, WU Ling, LU Fa-xing

(*Electronics Engineering School, Naval University of Engineering, HuBei, Wuhan 430033, China*)

Abstract: In the coordinative path planning for distributed multiple missiles, an improved Voronoi diagram is introduced to construct a set of feasible flight paths of the missiles, and a model is presented for calculation of the cost of each path taking the threat and fuel into account. Aiming at minimizing the total cost of the paths and the greatest time difference of arriving of all the missiles, the multi-platform missile path planning problem is modeled as a distributed constrained optimization problem (DCOP), and is well solved with existed DCOP algorithms. A typical scenario is simulated to verify the presented method. The simulation results show the optimized path planning can be obtained, the computational time cost, as well as the communication cost is moderate, and the method is validate in practical applications.

Key words: multi-missile cooperation; improved Voronoi diagram; cooperative path planning; distributed constrained optimization problem

1 概述

未来的海上编队协同对海攻击中, 往往需要利用不同平台发射的多枚远程精确制导反舰导弹进行协同作战, 即多枚导弹从编队的不同平台发射, 并尽量从不同方向、同一时刻对目标发动攻击, 以增加突防能力, 提升打击效果, 这就引出了多平台导弹协同航路规划问题^[1]. 多平台导弹协同航路规划是根据任务要求, 在威胁分布、导弹机动特性、燃料限制等约束下, 为每枚导弹寻找满足约束条件并能最优完成预定任务的航路.

协同航路规划问题近年来在多个无人机、机器人、导弹、航行器的协同控制中已得到深入研究^[2~6]. 目前文献中协同航路规划可分为集中式规划和分散规划两

类. 集中式规划一般是在一个已知全局问题的中心计算机上进行统一的航路规划计算, 可进行离线预规划, 相应的规划算法可分为两大类, 一是精确计算法, 如各类数学规划^[2]、离散搜索法^[3]等, 二是智能优化方法, 如遗传算法^[4]等. 分散式规划一般用于多机群的在线实时规划^[5,6], 例如可以通过各机在航行中利用通信网络共享各自的协同变量和协同函数^[5], 从而实现求解过程的分散化和动态化.

但多平台多导弹的协同航路规划问题, 用目前已有的方法尚不能很好解决, 原因在于: 1) 多平台多导弹的协同航路是由不同发射平台在发射前预先规划的, 随着编队协同作战成为未来作战趋势, 多平台多武器的协同控制也要求具有分布式特点, 而目前的离线规划法多采

用集中式方式完成,难以满足实际问题求解中的分布式要求;2)导弹在发射后难以像无人机那样进行相互通信和动态航路重规划,且飞行速度一般是预先设定,不可能像无人机那样按需调整,因而基于协同变量和协同函数的在线分散式规划方法不适用.可见,多平台多导弹协同航路规划问题的求解还需要研究引入新的方法.

本文利用改进的 Voronoi 图建立导弹的可行航路集,在此基础上,将多平台导弹协同航路规划问题建模为分布式约束优化问题(Distributed Constrained Optimization Problem, DCOP),并利用分布式约束优化算法求解问题,得到多导弹的最优航路,在对典型实例的仿真中,还给出了协同规划时间、通信量等指标,为模型方法在实际应用中的有效性分析奠定了基础.该方法也可为多无人机、航行器等多自主体协同路径规划问题求解提供参考.

2 多导弹协同航路规划建模

2.1 Voronoi 图的建立

Voronoi 图是计算几何学中一种重要的几何结构,其应用在航路规划中的最大特点是可根据已知战场威胁源分布情况生成初始可选路径集. Voronoi 划分的原理如下:对于在平面内产生的若干个初始点,连接相邻两初始点构成一系列线段,作这些线段的垂直平分线,形成一系列凸多边形,这些凸多边形构成了区域的划分,该划分称为 Voronoi 图.假定各威胁体 W 的位置已知,所有威胁体均视为质点,那么其 Voronoi 划分为 $V(W) = \{V_1, \dots, V_i, \dots, V_n\}$,对于任意一个 Voronoi 区域 V_i 可表示为 $V_i = \{q \in Q \mid |q - w_i| \leq |q - w_j|, \forall i \neq j\}$,式中 Q 为所有多边形的集合.三个威胁体所生成的 Voronoi 图如图 1 所示,生成威胁体的 Voronoi 图具有如下特性:

- 1) 每个 Voronoi 区域内仅含一个威胁体;
- 2) 每个 Voronoi 区域内的点到相应威胁体的距离最近;
- 3) 位于 Voronoi 区域边上的点到其两边的威胁体的距离相等.

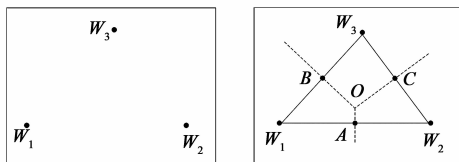


图1 Voronoi图的生成

2.2 改进型 Voronoi 图的建立

然而,在实际战场中,威胁体的类型并非都是相同的,如果考虑威胁体都具有相同的威胁等级,这将与实

际战场存在较大差异,因此在不同类型威胁体下进行航路规划,对提高导弹的生存概率以及完成预定任务的成功率有较大的实际意义.

通过预警机或者卫星探测导弹飞行区域内存在的威胁体,对威胁体进行分类,根据经验进行打分.假定威胁等级分为 10 种类型,假设远程导弹威胁程度最高,打 10 分,中程、近程导弹分别是 8、6 分,远程、中程、近程雷达分别打 4、3、2 分,舰炮打 1 分,等等.

假设 W_1, W_2 是局部空域内的两个威胁体,按照上述原则对其进行打分,得到威胁体的威胁等级,用 TG_1, TG_2 表示.当威胁体的威胁等级不相等时,有如下性质:假设 W_2 的威胁值是 W_1 的 k 倍,即 $TG_2 = k \times TG_1$,这里 $k > 1$,那么到 W_2 的距离是到 W_1 距离 k 倍的点的轨迹是圆,如图 2 所示.

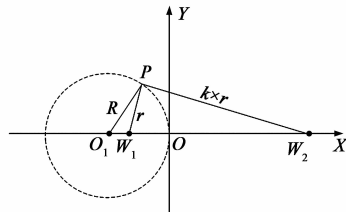


图2 两个不同威胁体的坐标图

由上述性质可知,随着 k 值的增大,圆半径 R 越来越小, W_1 和 W_2 的差异越大,路径自然向威胁小的一侧弯曲.当 $k = 1$ 时,即 W_1 和 W_2 的威胁等级相等,导弹的飞行路径自然选择 W_1, W_2 连线的垂直平分线,此时威胁最小.但当两个威胁体的有效威胁半径足够大而使威胁区重叠时,则认为该条路径无效.

对于局部空域内三个不同威胁体 W_1, W_2 和 W_3 ,通过上述定义可得到其 Voronoi 图,如图 3(a) 所示,其中 A, B, C 为三条边的分割点.当威胁体和威胁等级确定时,由公理可知,分割点组成 $\triangle ABC$ 内心 O 所在位置点也唯一确定.为减少威胁,导弹的飞行路径将分割点 A, B, C 以及内心 O 作为必经路径点.例如,导弹从 A 点飞到 C 点,飞行路径为弧 AO 和弧 OC ,如图 3(b) 中实线所示.为简化计算,可将连接内心 O 和分割点的直线来近似地替代弧段,即 A 点飞到 C 点的航程就是 AOC 的折线长度,如图 3(b) 中实线所示,称之为改进型 Voronoi 图.当威胁体的威胁等级相等时,改进型 Voronoi 图将退化为常规 Voronoi 图.

2.3 多导弹协同航路规划的优化目标函数

根据威胁区域内导弹和雷达的布置情况建立的改进型 Voronoi 图,如图 4(a) 所示.但 Voronoi 图的产生并没有考虑到导弹平台的初始位置以及目标的位置.而要产生一条初始路径,导弹平台的初始位置和目标点必须以某种方式连接到图表上.一种简单的方法是将

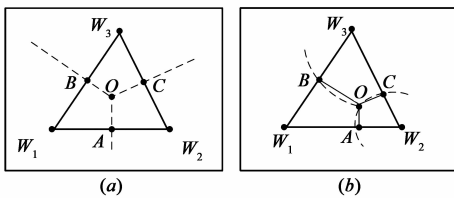


图3 三威胁体的局部路径规划图

起始点和目标点与图表最近的若干个节点相连^[7],在图4(b)中以虚线表示,也可认为其是改进 Voronoi 图中的一部分.经过这样的处理,由改进型 Voronoi 图中可以找出若干条从起始点到达目标点的航路,例如{初始点-1-2-3-4-5-目标}便是一条航路,但对于任何一条航路,都有其相对应的代价.

对于单导弹航路,本文将考虑常用的与距离直接相关的危险代价和燃油代价,其中威胁代价包括雷达系统和防空导弹所带来的威胁代价.而对于多导弹协同航路的总代价,是在单导弹航路代价的基础上,综合各导弹到达目标的最大时间差代价所组成.

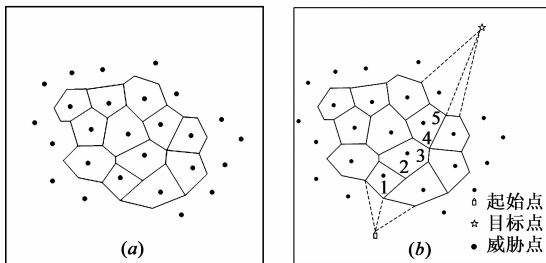


图4 改进型Voronoi图

2.3.1 雷达威胁代价 $J_{rthreat}$

假定导弹在飞行过程具有相同的雷达反射截面,则导弹反射雷达回波的强度就与其到雷达的距离的四次方成反比,与其威胁等级成正比.导弹沿着 Voronoi 边飞行的威胁代价即为雷达威胁在该边上的积分,则第 i 条边到第 j 雷达的威胁代价 $J_{rthreat,i,j} = \int J(L, TG) dl$.为了简化计算,将每条边进行离散,6等分后取其中三个点(1/6, 3/6, 5/6)的代价的平均值来代替整条边的代价,即 $J_{rthreat,i,j} = L_i \left(\frac{1}{d_{1/6,i,j}^4} + \frac{1}{d_{3/6,i,j}^4} + \frac{1}{d_{5/6,i,j}^4} \right) \times TG_j$,这样第 i 条边的雷达威胁代价之和 $J_{rthreat,i} = \sum_{j=1}^N J_{rthreat,i,j}$,其中 L_i 为第 i 条边的长度, N 为雷达的数目.

2.3.2 导弹威胁代价 $J_{mthreat}$

对导弹的飞行安全产生实质性威胁的是防空导弹,在防空导弹的杀伤区内,防空导弹的威胁与其命中概率 P 成正比,且与相对距离 L 相关.则第 i 条边到第

j 导弹的威胁代价 $J_{mthreat,i,j} = \int J(P, L) dl$,同理,用上述方法进行离散平均,这样第 i 条边的导弹威胁代价之和 $J_{mthreat,i} = P \sum_{j=1}^M L_i \left(\frac{1}{d_{1/6,i,j}} + \frac{1}{d_{3/6,i,j}} + \frac{1}{d_{5/6,i,j}} \right)$,其中 M 为威胁导弹的数目.

2.3.3 燃油代价 J_{fuel}

导弹燃油消耗和飞行路径的长度成正比,则导弹沿着第 i 条边飞行时的燃油代价为: $J_{fuel,i} = f(L_i)$,其中 $f(\cdot)$ 为线性燃油代价函数.

2.3.4 时间差代价 J_{time}

为了简化计算,假定导弹做匀速飞行,设导弹 m_k 从发射到到达目标的飞行时间为 t_k ,则多平台导弹协同航路的时间差代价 J_{time} 可设为与导弹到达目标的最晚时间 $t_{\max} = \max \{ t_k | k = 1, 2, \dots, K \}$ 和最早时间 $t_{\min} = \min \{ t_k | k = 1, 2, \dots, K \}$ 之差成正比,即 $J_{time} = g(t_{\max} - t_{\min})$,其中 $g(\cdot)$ 为线性时间差代价函数, K 表示多平台发射的导弹数.

2.3.5 多导弹协同航路的总代价

第 i 条边的代价为威胁代价加上燃油代价:

$$J_i = J_{rthreat,i} + J_{mthreat,i} + J_{mfuel,i} \quad (1)$$

则导弹 m_k 的一条完整航路的代价 $J^k = \sum_{i \in I} (J_{rthreat,i} + J_{mthreat,i} + J_{mfuel,i})$,其中 I 为组成航路所有边的集合.多导弹协同航路的总代价为各导弹航路代价加上时间差代价,即

$$J = \sum_{k=1}^K q J^k + (1-q) J_{time} \quad (2)$$

其中 $q \in (0, 1)$ 为权值系数,体现威胁代价和时间差代价之间的一个折衷.

2.4 多平台导弹协同航路规划的 DCOP 模型

在航路代价计算完成后,单枚导弹的航路规划问题也就可归结为一个求解网络图最优路径的约束优化问题,也就是从网络图的所有节点中选取一些节点,使得导弹在沿这些节点所形成的航路上飞行时总的代价最小.而多平台导弹协同航路规划,是在单枚导弹航路规划的基础上,为多枚导弹寻找最优或次优路径,使多导弹面临的总的威胁值最小,且到达目标最大时差最小.

本文将多平台导弹协同航路规划建模为分布式约束优化问题.分布式约束优化问题已成为分布式人工智能研究中的一个基础问题和热点问题,它一般由一系列变量(每个变量对应于多智能体系统中的某个智能体 agent)、变量相应的值域以及变量之间的约束关系组成,要求为这些变量找到一组满足所有约束关系的赋值,且使问题求解的目标成本函数最优^[8,9].多平台

导弹协同航路规划的 DCOP 模型可描述如下。

变量及其取值:每枚导弹 m_k 对应一个已知其性能指标的 agent,每个 agent 对应一个变量 x_k ,该变量取值由组成可行航路的节点构成,如图 4(b)中,[1 2 3 4 5]便是其中一条航路的组成节点,因而也是 x_k 的一个值;

定义域:变量 x_k 的定义域 D_k 为导弹到达目的地所有可行航路的集合;

约束条件:主要考虑两方面,1)航路距离约束,对于每枚导弹 m_k ,其航路的长度必须小于或等于一个预先设定的最大距离,它取决于导弹所携带的燃油所允许的飞行时间;2)为了保障导弹飞行时的安全,导弹之间的航路不能有交叉点(终点除外)。

优化目标函数:由式(2)描述,是使多导弹尽可能同时达到目标,且通过威胁区内总的代价最小。

DCOP 的求解技术早期一般是在分布式环境中利用回溯搜索进行寻优,例分布式随机搜索算法 DSA^[8]等,相应算法能快速找到问题的一个优化可行解,但不同时具备分布式、异步性和完备性。目前用于求解 DCOP 的主流算法是异步分布式约束最优算法(Asynchronous Distributed OPTimization,ADOPT)^[9]和动态规划

最优协议算法(Dynamic Programming Optimization Protocol, DPOP)算法^[10],它们都同时具备分布式、异步性和完备性。在建立了多导弹协同航路规划 DCOP 模型的基础上,可用相应的 DCOP 算法,如 Adopt、DPOP、DSA 等进行规划求解。

3 仿真实验

本文的仿真计算在用于 DCOP 求解的 Frodo 平台上进行,Frodo 是基于 java、解决分布式组合优化问题的平台。本文在该平台上通过建立多导弹协同航路规划问题的 XCSP 格式的构造文件,用 ADOPT 和 DPOP 算法对问题进行求解计算。

仿真假定在 150km × 150km 的战场环境,如图 5(a)所示,有 13 个雷达或者导弹威胁点,其坐标和威胁等级如表 1 所示,01、07、13 为导弹威胁点,其余均为雷达威胁。我方有两个导弹平台,坐标为(60, 20), (70, 20), 目标点的坐标为(134, 140), 假定导弹型号相同,导弹的作战半径 200km,飞行速度为 340m/s,要求 2 个导弹平台发射导弹对敌目标进行协同打击,为保证导弹的突防概率,导弹应尽量远离敌方威胁区域。

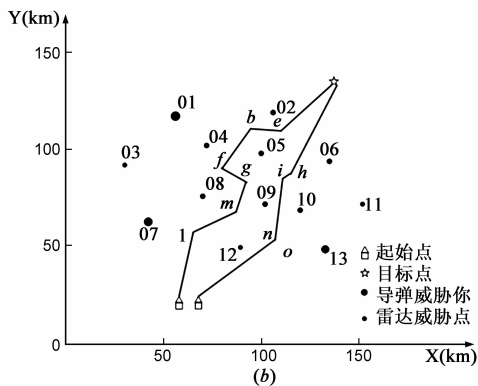
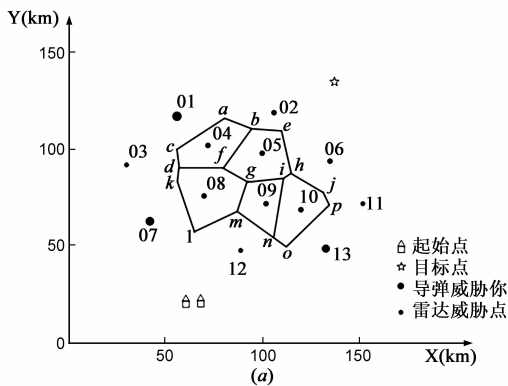


图5 多平台导弹协同航路规划仿真

表 1 威胁体的编号、坐标及威胁等级

编号	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13
X 坐标(km)	62	106	30	73	100	132	41	70	103	120	152	92	133
Y 坐标(km)	118	120	82	102	97	98	60	76	72	68	73	47	50
威胁等级	8	3	2	2	2	4	6	2	3	2	2	3	6

应用改进型 Voronoi 图进行构图,对 Voronoi 图中各边的顶点进行编号,并按照式(1)计算 Voronoi 图各边以及起点、目标点到 Voronoi 图最近的若干个节点的相应代价,设 $q = 0.5$,表示导弹在协同打击实时性和避免威胁方面同等重要,各边代价计算如表 2 所示。

将两平台导弹协同航路规划问题建模为 DCOP,分别用 ADOPT 和 DPOP 算法进行求解,最终得到的各导弹

航路如图 5(b)所示,其中导弹的飞行路径、路径长度、飞行时间、总代价以及算法的仿真时间等如表 3 所示。

表 2 各边威胁代价和长度

节点编号	a-b	a-c	b-e	e-h	h-i	h-j	j-p	p-o	o-n	m-n
威胁代价	0.183	13.73	1.813	1.2	0.653	1.556	0.517	5.377	0.413	2.180
长度	9.311	38.03	17	17.35	15.27	25.06	10.56	26.04	7.474	28.48
节点编号	m-l	l-k	k-d	d-c	d-f	f-b	f-g	g-i	g-m	i-n
威胁代价	0.352	5.89	0.254	0.208	1.706	1.362	0.32	1.938	0.894	1.983
长度	6.998	39.14	10.75	8.762	29.68	20.77	7.775	16.47	15.77	26.44

表 3 仿真结果

算法	导弹	规划路径	长度(km)	飞行时间(s)	总代价	仿真时间(ms)	信息交换量
ADOPT	导弹 1	$l \rightarrow m \rightarrow g \rightarrow f \rightarrow b \rightarrow e$	159.038	467.8	10.825	37	3419byte
	导弹 2	$n \rightarrow i \rightarrow h$	154.867	455.5			
DPOP	导弹 1	$l \rightarrow m \rightarrow g \rightarrow f \rightarrow b \rightarrow e$	159.038	489.5	10.825	39	2946byte
	导弹 2	$n \rightarrow i \rightarrow h$	154.867	467.8			

由仿真结果可见,基于 DCOP 模型的两枚导弹协同航路规划时间在几十微秒,数据交换量也只有几个 KB,能够满足实战需求,因而算法具有实际应用的可行性。

4 结论

多平台导弹协同航路规划是一个在分布式条件下求解多导弹最优路径的问题,本文对多平台导弹协同航路规划问题进行了描述分析,考虑到战场存在不同威胁体,运用改进型 Voronoi 图,构建了不同威胁分布下导弹可行航路集。在建立威胁和燃油模型的基础上,得到各段航路的代价,同时考虑了导弹到达目标点的时间差,将多平台导弹航路规划问题建模为分布式约束优化问题来进行求解。仿真结果表明此模型方法可在分布式条件下对多导弹协同攻击航路实现寻优计算,且计算量和通信量较小,可满足实际应用要求。

参考文献

- [1] 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[J].电子学报,2009,37(9):95-99.
Lu faxing, Wu ling, Dong yinwen. Research on the attacking mode for blind launch of anti-ship missiles with route-planning capability [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 95-99. (in Chinese)
- [2] Zhong hua Hu, Min Zhao, Min Yao. Cooperative attack path planning for unmanned air vehicles swarm based on grid model and bi-level programming[J]. Journal of Information & Computational Science, 2011, 8(4): 671-679.
- [3] 马培蓓,纪军.3种多导弹航迹规划算法的比较[J].电光与控制,2010,17(10):28-32.
Ma peibe, Ji jun. Comparison of three algorithms for multi-missile path planning [J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(10): 28-32. (in Chinese)
- [4] Eun, Yeonju, Bang. Cooperative task assignment/path planning

of multiple unmanned aerial vehicles using genetic algorithms [J]. Journal of aircraft, 2009, 46(1): 338-343.

- [5] Timothy W McLain, Randal W Beard. Coordination variables, coordination functions, and cooperative timing missions [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2005, 28(1): 150-161.
- [6] 袁利平,陈宗基,周锐等.多无人机同时到达的分散化控制方法[J].航空学报,2010,31(4):797-805.
Yuan liping, Chen zongji, Zhou rui. Decentralized control for simultaneous arrival of multiple UAVs [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2010, 31(4): 797-805. (in Chinese)
- [7] 张同法,于雷,鲁艺.多架无人机协同作战的路径规划[J].火力与指挥控制,2009,34(2):143-145.
Zhang tongfa, Yu lei, Lu yi. Trajectory planning for coordinated rendezvous of unmanned air vehicles [J]. fire control & command control. 2009, 34(2): 143-145. (in Chinese)
- [8] W Zhang, Z Xing, G Wang, L Wittenburg. Distributed stochastic search and distributed breakout: properties, comparison and applications to constraints optimization problems in sensor networks [J]. Artificial Intelligence, 2005, 161(1-2): 55-87.
- [9] P Modi, W Shen, M Tambe. ADOPT: asynchronous distributed constraint optimization with quality guarantees [J]. Artificial Intelligence, 2005, 161: 149-180.
- [10] A Petcu, B Faltings. A Scalable Method for Multiagent Constraint Optimization [A]. In proceedings of IJCAI 05 [C]. Edinburgh Scotland UK, 2005. 266-271.

作者简介

雷兴明 男,1987年出生,四川泸州人,主要研究方向:分布式智能优化。

邢昌凤 男,1957年出生,安徽芜湖人,教授,博士生导师.主要研究方向:作战系统效能分析。

E-mail: xingchf@sohu.com