

文章编号: 1001-0920(2010)01-0157-04

## 多 UAV 协同突防规划与仿真

任敏, 王克波, 沈林成

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

**摘要:** 针对在复杂大范围环境下低空突防的多无人飞行器, 通过分析威胁环境和协同突防的相关要素, 提出了协同规划框架, 设计了基于空间冲突预处理的打击时序协同算法; 提供突防效能计算的基于变步长时间同步目标分配算法; 通过协同突防航迹选择优化算法的不断迭代计算, 实现协同突防规划. 仿真分析验证了规划算法的有效性.

**关键词:** 无人飞行器; 协同规划; 时间标记序列; 突防概率; 目标分配

中图分类号: TP24

文献标识码: A

### Planning and simulation for multi-UAV cooperative penetration mission

REN Min, WANG Ke-bo, SHEN Lin-cheng

(College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China. Correspondent: REN Min, E-mail: ren1999@263.net)

**Abstract:** This paper proposes a cooperative planning framework for multiple low-level penetration unmanned aerial vehicles(UAVs) by analyzing threat environments interfering factors of cooperative penetration. Based on space confliction, a strike order coordinate algorithm is designed to preprocess deconfliction. Then a synchronized target assignment algorithm of varying timing steps is provided to maximize penetration efficiency. An iterative UAV route optimal selection algorithm is described. Simulation analysis shows the effectiveness of the proposed planning algorithm.

**Key words:** unmanned aerial vehicle; cooperative planning; time stamp ordering; penetration efficiency; target assignment

## 1 引言

在复杂大范围环境下, 诸如巡航导弹、长航时无人机等无人飞行器, 往往要飞行几个小时、上千公里来执行任务, 针对这些任务, 必须预先完成任务规划. 低空或超低空飞行是无人飞行器的主要突防手段, 因此有必要研究通过协同突防, 获得最佳突防成功率的规划方法.

文献[1]提出以协同时间作为指标建立协同管理层的思想, 在协同的基础上通过规划算法实现路径规划和航迹控制. 本文所研究问题的不同之处在于, 航迹规划范围大、规划时间长. 对于这一类飞行器, 往往预先规划大量航迹, 在规划过程中, 主要考虑怎样选择航迹和安排好批次时序. 因此, 协同突防规划需要协同规划层与包含了备选航迹库的航迹规划层共同完成规划任务.

基于以上问题, 本文研究的问题应归结到任务分配和规划的范畴, 而任务分配与规划就是在众多的

匹配方法中寻找一个最合理的子任务分配方案. 它与货郎担问题和背包问题均有相似的特点, 均是典型的、易于描述却难以处理的 NP 完全问题<sup>[2]</sup>.

## 2 威胁环境建模与分析

对于突防规划而言, 需要建立合理的敌方数字化威胁环境, 并且对于规划形成的无人飞行器航迹, 能够评估计算出可信的突防概率.

对于飞行器的威胁环境模型, 考虑的因素应涵盖现代防空战场战斗力要素, 除了基本的探测类(预警机雷达、地(海)面防空雷达、制导雷达等)和歼毁类(地空导弹、高炮等)威胁单元外, 应特别考虑防空 C2 系统对探测类和歼毁类武器系统的协调与控制, 以及这种体系条件下对飞行器的探测、拦截能力的影响<sup>[3]</sup>.

区域防空体系作战过程中, 在防空 C2 系统的指挥下, 防空火力单元的目标分配过程主要包括 3 个阶段: 1) 空袭目标威胁评估与排序; 2) 拦截可能性检

收稿日期: 2009-10-26; 修回日期: 2010-02-02.

作者简介: 任敏(1976—), 男, 讲师, 博士生, 从事任务规划的研究; 沈林成(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事飞行器任务规划、智能控制等研究.

查; 3) 进行目标优化分配处理, 得到分配结果, 为确定发射决策提供依据. 上述 3 个阶段是循环往复进行的.

基于上述分析, 建立了预警机、雷达、地空导弹和高炮的单个威胁解析模型, 以及防空火力单元武器特征参数和经验知识数据库. 对于一次突防概率计算, 若给定防空部署, 确定防空火力单元的目标分配方案, 则能计算出飞行器的全航迹突防概率为

$$P_{tl} = 1 - P_t(P_{s \cup h}), \quad (1)$$

其中  $P_{s \cup h}$  的物理意义为受到歼毁类威胁杀伤的概率, 与雷达的探测概率  $P_t$  相乘, 便得到全航迹的威胁概率值, 进而得到全航迹突防概率值  $P_{tl}$ .

### 3 问题分析与协同规划框架

以对地打击作战任务为例, 多个飞行器共同完成打击任务, 即通常所说的批次打击任务. 形成打击批次更有利于飞行器间相互协同, 有利于突破敌方的防御体系. 多个飞行器协同的要求主要是空间上和时间上的协同要求, 特别是在有限航迹的条件下, 选择确定数目的飞行器 (不同飞行器可以重复使用同一条航迹), 共同完成打击任务. 这种情况下, 更需要合理安排打击批次.

表 1 协同要素分析

要素	原因分析	协同突防规划对策
时间要素	防空单元性能参数 (目标通道数、反应时间等) 的局限性	应该尽可能共同突破防空火力单元, 导致火力单元在目标分配和拦截准备上捉襟见肘
空间要素	密集飞行时不能与友军相撞	需要在空间上设置间隔, 必要时, 用时间换空间
航迹品质	充分利用地形做掩护, 可以显著提高突防能力	选择航迹时, 尽可能优选品质较优的航迹
威胁部署	再好的部署也必然存在薄弱的环节	通过威胁评估分析, 寻找防御弱点

在上述分析的基础上, 规划的总体过程描述如下: 以巡航导弹为例, 在备选航迹库中, 查找与当前目标匹配的航迹. 一般情况下, 选择的航迹的规模  $L \geq 2W$ ,  $W$  为目标所需的成爆弹量; 对这些选中的航迹进行预处理, 包括单条航迹突防概率评价、航迹空间冲突预处理. 协同规划层通过协同航迹选择算法选择数目至少为  $W$  的航迹作为初始解, 且优先选择静态突防概率较优的航迹. 基于空间冲突标记, 规划打击时序, 将安排了时序的航迹批次进行整体批次的突防效能评估. 根据突防的评估结果, 考察批次能否满足打击的成爆要求, 如果不满足, 则逐个增加导弹的数量, 直到满足成爆要求, 规划过程结束.

规划的框架如图 1 所示, 规划包括航迹规划层和协同规划层.

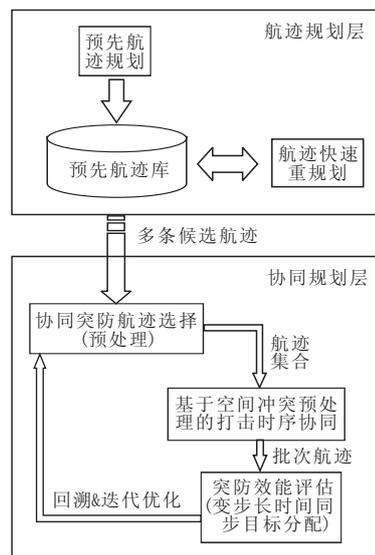


图 1 协同突防规划框架

### 4 协同突防航迹选择优化算法

攻击同区域目标的多个飞行器组成协同攻击批次, 为了充分发挥多个飞行器的协同攻击优势, 需要协同管理层对多飞行器进行有效的协调. 协同规划层主要对多飞行器的协同攻击航迹选择、攻击时机确定、协同攻击代价和性能进行协调.

定义批次代价函数

$$J = \sum_{i=1}^n J_i(x_j, P_j). \quad (2)$$

其中:  $n$  为批次中飞行器个数,  $J_i$  为第  $i$  个飞行器的飞行航迹代价,  $x_j$  为第  $i$  个飞行器规划出的第  $j$  条飞行航迹,  $P_j$  为第  $i$  个飞行器沿着  $x_j$  飞行的突防概率.

对于协同突防航迹选择, 考虑采用近似解法. 本文采用了基于回溯策略的贪婪随机自适应搜索算法<sup>[4-5]</sup>, 该算法通过生成具有一定多样性的优质初始解来提高算法的性能. 它是一种多次启动的局部搜索过程, 每一次迭代由两个阶段组成:

第 1 阶段: 通过贪婪随机自适应构造算法构造初始解, 并假设解由一组已分配了时序的航迹构成. 根据威胁环境模型, 为每条候选的航迹计算一个静态突防概率评价, 表示在当前威胁环境情况下, 将此航迹加入到航迹集合中的基本优劣程度. 选取评价高的航迹集合并安排时序, 随机选择至少  $W$  条航迹集合构成一个初始解.

第 2 阶段: 通过一个局部搜索算法, 优化在第 1 阶段中构造出的初始解. 根据代价评估函数, 评估每个瞄准点的毁伤程度, 为没有达到毁伤要求的瞄准点增加一枚导弹, 并通过局部搜索, 寻找满足要求的被选航迹. 不断迭代, 直到满足毁伤要求为止.

算法受到初始解的随意性限制, 在时间允许的情况下, 通过回溯重新构造初始解, 以期获得更好的分

配效果.

### 5 打击时序协同算法

确保航迹协同的一个重要环节是保证消解航迹空间冲突. 消解空间冲突的方法有两个: 一是调整航迹, 回避冲突位置; 二是调整航迹时序, 使得冲突的航迹依次通过冲突位置. 对于该问题, 采取后者更有利于提高整体算法的效率, 因此本文设计了基于航迹空间冲突预处理的时间协同算法, 将可能的空间冲突作为冲突事件提前计算, 在时间协同的同时作为约束反映进来, 通过时间调整, 消解空间冲突.

算法解决由  $i$  枚已分配导弹集(已确定时序)增加第  $i + 1$  枚导弹的时序分配问题, 时序分配以秒为单位, 以自然数集合  $N$  作为时序备选集合, 算法协调导弹的命中时序, 输出导弹发射时刻为

$$TL_i = T_0 - TI_i. \tag{3}$$

其中:  $TL_i$  为第  $i$  枚导弹的发射时刻,  $T_0$  为该批次第 1 枚导弹的命中时刻,  $TI_i$  为第  $i$  枚导弹的命中时刻. 在安排第  $i + 1$  枚时序时, 将与当前所选航迹有冲突的航迹时序依次计算出来, 形成冲突时序集合  $D$ , 第  $i + 1$  枚时序选择为

$$TI_{i+1} = \min(N \cap \bar{D}). \tag{4}$$

对于冲突主要包括两种情况: 1) 同一条航迹被重复使用, 冲突是一个时间区间; 2) 通过预处理发现的空间交汇情况, 根据相交点距离目标的飞行时长, 同样可以计算出冲突的时间区间.

### 6 变步长时间同步目标分配算法

防空火力单元目标分配是在 C2 系统的指引下, 各防空单元节点之间相互关联、相互制约, 在进行目标分配的过程中它们之间必须同步运行.

防空火力单元目标分配问题中, 节点的时间推进机制采用时间步/事件步混合机制, 即节点采用时间步机制推进, 而选取的时间步长是变步长的. 防空火力单元联网状态下, 节点的时间推进可能受 C2 系统中其他火力单元节点的影响, 影响方式是节点与 C2 系统之间相互发 TSO(time stamp ordering) 消息, 这是带有时间戳的消息. 某个节点发出时间推进到  $T$  的请求后, 可能会收到其他节点发来时间早于  $T$  的 TSO 消息, 比如时间推进请求, 该消息还可能触发时间早于请求推进时间的事件.

图 2 中, 节点代表防空火力单元; 事件代表截获、分配等事件; 消息代表时间推进请求或新事件产生. 假设有 2 个节点 A 和 B, 节点 A 在  $TA_1$  时刻处理雷达截获事件  $A_1$  后, 请求推进到时刻  $TA_4$ , 并向 C2 系统发送截获消息. 由于  $TA_4 > TB_1$ , 节点 B 在  $TC_1$  时刻处理事件  $C_1$  后, 请求推进到时刻  $TC_2$ . 该消息的时间

戳早于节点 A 的请求推进时间, 需交付 C2 系统处理, 期间触发一个时间戳为  $TA_2$  的分配事件  $A_3$ , 其时间戳  $TA_3$  同样早于节点 A 的请求推进时间  $TA_4$ , 必须先行处理. 因此, 在 C2 系统的统一协调下, 每个防空火力单元的时间由节点的推进请求时间和由其他节点发来的 TSO 消息的时间戳共同确定.

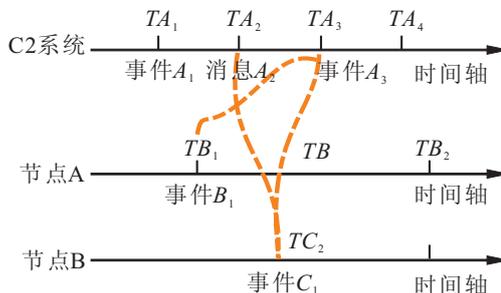


图 2 节点时间推进受其他节点的影响

如果将 TSO 消息类和事件类进行适当编码, 则每个节点的控制机制中待处理的 TSO 消息和事件就可以按时间顺序组成如图 3 所示的队列.



图 3 待处理的事件和 TSO 消息队列

图 3 中,  $ID_i$  为事件类或 TSO 消息类编码;  $TS_i$  为事件或 TSO 消息的时间戳,  $TS_1 \leq TS_2 \leq \dots \leq TS_M$ ;  $M$  为某一时刻待处理的 TSO 消息和事件数量. 在节点的控制机制中, 设置两个表格, 表 2 表明某类事件处理完后是否向其他节点发送 TSO 消息, 发到哪些节点; 表 3 表明某类消息处理完后是否触发新的事件.

表 2 某类事件可能产生的消息

事件编码	发送消息编码	发往节点
4XXX	3XXX 或 NULL	$N_i$

表 3 某类消息可能触发的事件

消息编码	触发事件编码
3XXX	4XXX 或 NULL

根据表 2 和表 3, 就可以从事件和 TSO 消息队列中确定节点请求推进的时间. 节点将请求推进的时间定在第 1 个影响其他节点时间推进的事件和 TSO 消息所带的事件戳  $TS_k$ . 影响其他节点时间推进的事件是指 C2 系统处理后会给其他节点发送 TSO 消息. 影响其他节点时间推进的消息是指 C2 系统处理后触发新的事件, 而该事件的处理又会给其他节点发送 TSO 消息.

当有新事件发生, 且该事件没处于待处理时间队列中时, 需按照该事件的时间戳和事件发生的先后顺序, 将事件插入到队列中.

各个防空火力单元节点每推进到共同的时间后,事件和 TSO 消息队列中所有时间戳  $T_s$  小于或等于  $T_1$  的事件和 TSO 消息均会交给 C2 系统处理. 这样,可以保证系统的逻辑一致性,因此算法实现的是安全同步控制机制.

## 7 仿真分析

选择结果如表 4 所示. 其中列出了各导弹编号 MID 所对应的目标编号 AID 和瞄准点编号 DID, 采用的航迹序号 JID, 发射的时序  $T$ , 计算出批次突防条件下各导弹的突防概率  $P_b$ , 并在表中最后一列列出非批次突防下单条航迹的突防概率  $P_d$ .

表 4 批次突防数据记录表

MID	AID	DID	JID	$T$	$P_b/\%$	$P_d/\%$
1	0	2	6	389	75	60
2	0	1	6	419	75	60
3	0	2	0	0	64	64
4	0	0	13	559	64	50
5	0	1	0	912	64	64
6	0	2	13	574	64	50
7	1	0	37	97	100	76
8	1	1	46	409	76	70
9	1	2	37	424	100	76
10	1	0	46	15	76	70
11	2	1	71	53	54	43
12	2	2	61	62	76	50
13	2	0	71	528	84	43
14	2	1	71	30	44	43
15	2	2	64	404	76	60
16	2	0	80	904	76	64

从上述数据可以看到, 导弹编号为 7 和 9 的导弹在批次突防中的突防概率为 100%, 均大于原有的突防概率 6%. 这是因为导弹编号为 8, 11, 12 的导弹已经将火力单元的通道构成了饱和, 导致后到达的导弹因为没有足够的通道分配而没法拦截, 突防概率提高至 100%.

将批次突防战术应用条件下各导弹的突防概率与非批次突防条件下导弹沿各航迹的突防概率进行比较, 如图 4 所示. 从图 4 中可以明显看出, 在批次突防的条件下, 各导弹的突防概率整体上比各导弹单次突防的情况要高. 这一方面是由于在批次突防中, 导弹对敌方防空火力单元构成了饱和攻击, 使得敌方防空火力单元通道成饱满状态, 无力拦截后续导弹的攻击; 另一方面, 重新装弹等原因使得反应时间增长, 导致批次目标突防给予防空火力单元的压力远远大于单发导弹来袭, 降低了防空火力单元整体的作战效能.

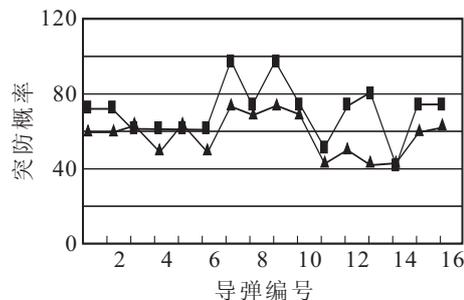


图 4 批次突防与非批次突防的概率比较

## 8 结 论

本文在威胁环境建模和分析的基础上, 建立了协同突防规划环境, 通过调整多枚导弹间的协同关系, 提高了批次突防的整体效果. 下一步对这一问题的研究还可以深入到航线规划层面, 通过调整航迹, 进一步改进空间协同关系, 提高协同突防能力.

## 参考文献(References)

- [1] 高晓光, 符小卫, 宋绍梅. 多UCAV航迹规划研究[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(5): 140-143.  
(Gao X G, Fu X W, Song S M. Trajectory planning for multiple uninhabited combat air vehicles[J]. Systems Engineering - Theory and Practice, 2004, 24(5): 140-143.)
- [2] Fogel D B. Applying evolutionary programming to selected traveling salesman problems[J]. Cybernetics and Systems, 1993, 24(1): 24-36.
- [3] 刘海峰, 赵英俊, 娄寿春. 地空导弹武器系统火力分配模型[J]. 战术导弹技术, 2002, 13(1): 22-25.  
(Liu H F, Zhao Y J, Lou S C. Fire distribution model of surface to air missile weapon systems[J]. Tactical Missile Technology, 2002, 13(1): 22-25.)
- [4] 蔡荣英, 黄健, 林大辉. 独立任务分配的贪婪随机自适应搜索过程[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(21): 4036-4038.  
(Cai R Y, Huang J, Lin D H. Greedy randomized adaptive procedure for independent tasks assignment[J]. Computer Engineering and Design, 2006, 27(21): 4036-4038.)
- [5] 陈洪, 蔡佳, 张玉成, 等. 多分类贪婪算法的一致性[J]. 湖北大学学报, 2005, 27(4): 317-320.  
(Chen H, Cai J, Zhang Y C, et al. The consistency of greedy algorithms for multi-category classification[J]. J of Hubei University, 2005, 27(4): 317-320.)