

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.09.009

## 基于 Bellman-Ford 算法的空中编队协同对岸打击

陈榕<sup>1</sup>, 严建钢<sup>1</sup>, 吉礼超<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院指挥系, 山东 烟台 264001; 2. 海军驻重庆地区军事代表局, 重庆 400232)

**摘要:** 为提高空中编队协同对岸打击作战能力, 基于 Bellman-Ford 算法对空中编队协同对岸打击进行研究。为解决空中编队协同对岸打击作战中的时间协同问题, 针对空中编队协同对岸打击作战的时间约束特点并结合简单时间约束网络理论, 将其时间约束网络模型转化为简单时间约束网络模型; 为克服传统简单时间约束网络一致性检测算法时间耗费大的缺点, 提出借鉴 Bellman-Ford 算法检测一致性的新方法, 并以实例进行检测、分析。结果表明: 该方法能有效解决空中编队对岸打击作战中的时间协同问题, 能减小时间复杂度, 提高协同效率。

**关键词:** 空中编队; 协同对岸打击; 简单时间约束网络; 一致性检测; Bellman-Ford 算法

**中图分类号:** TJ03 **文献标志码:** A

## Air Formation Coordinated Operation Against Ground Based on Bellman-Ford Algorithm

Chen Rong<sup>1</sup>, Yan Jiangang<sup>1</sup>, Ji Lichao<sup>2</sup>

(1. Dept. of Command, Naval Aeronautic &amp; Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Military Representative Bureau of Navy Equipment Department in Chongqing Area, Chongqing 400232, China)

**Abstract:** For improving the ability of air formation coordinated operation against ground, the air formation coordinated operation against ground based on Bellman-Ford algorithm was researched. In order to resolve the time coordination problem of air formation coordinated operation against ground, the temporal constraint network (TCN) model on air formation was translated into simple temporal constraint network (STCN) model, according to the trait of temporal constraint on air formation coordinated operation against ground and STCN theory. To overcome the disadvantage of traditional STCN consistency testing algorithm on time consumption, a new algorithm be fit for dynamic coordination combining the character of air formation coordinated operation against ground was propounded. Theoretic analysis showed that: the time coordination problem in air formation coordinated operation against ground was resolved effectively, time complexity was decreased and coordinated efficiency was improved.

**Key words:** air formation; coordinated operation against ground; STCN; consistency testing; Bellman-Ford algorithm

### 0 引言

在空中进攻作战的整个筹划和实施过程中, 及时准确控制部队的作战行动十分重要<sup>[1]</sup>。空中协同作战已成为现代空中作战的基本样式。但战场态势瞬息万变, 对抗程度更加激烈, 传统的完全依靠人工和经验来完成各编队的协同已越来越不适应现代高科技条件下航空兵的作战要求。如何使各作战要素协调一致, 同步遂行作战任务, 提高空中编队协同对岸打击作战能力, 是当前迫切需要研究的一个重要课题。因此, 笔者运用 Allen. J 的时间约束网络理论<sup>[2-4]</sup>, 在充分研究空中编队协同对岸打击作战中的协同特点的基础上, 建立空中编队不同任务间的时间约束网络模型, 为指挥员预先制定科学合理的协同计划, 对原计划进行及时有效的调整提供有力的依据。

### 1 问题描述及时间约束网络的建立

时间变量分为点时间变量和区间时间变量, 其约束关系分为定性时间约束和定量时间约束 2 类。通过点时间变量和区间时间变量, 以及时间变量之间的定性时间约束关系和定量时间约束关系, 就可以全面描述空中编队协同对岸打击过程中的所有任务及任务之间的所有时间关系, 将空中编队协同对岸打击过程模型所描述的任务的时间特性转化为时间约束网络。

#### 1) 问题的描述。

遂行对岸打击作战任务的空中编队通常由具有不同功能的编组构成, 一般分为突击组、掩护组、侦察组和电子支援组等。编队中按需求可编配若干编组。为顺利完成对岸打击任务, 空中编队各个编组必须互相配合, 于恰当时机进行恰当的协同动作,

收稿日期: 2012-03-09; 修回日期: 2012-04-25

作者简介: 陈榕(1984—), 男, 江西人, 在读博士, 从事海军兵种作战数理战术研究。

以完成要求的任务。编组的任务之间存在时序约束、使能约束和促进约束等关系<sup>[5]</sup>。以上约束皆可转化为时间约束关系。

突击组对某目标的突击可能首先需要经过侦察组的侦察、压制组的压制支援、电子支援组的干扰才能执行。突击过程中需要伴随掩护, 突击完成后需要进行突击效果观校等。以上协同任务中, 侦察与突击具有时序约束关系; 压制、电子支援干扰、掩护与突击具有促进约束关系; 突击与观校构成时序约束关系。其时间约束关系如图 1 所示。

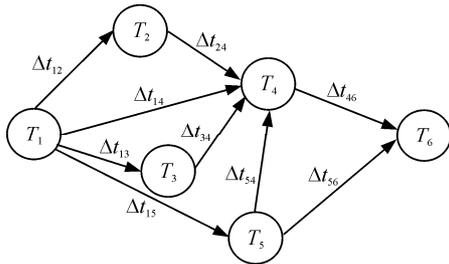


图 1 任务时间约束关系图

图 1 中,  $T_1$  为侦察任务;  $T_2$  为压制任务;  $T_3$  为电子干扰任务;  $T_4$  为突击任务;  $T_5$  为掩护任务;  $T_6$  为观校任务。

2) 简单时间约束网络。

简单时间约束网络 (simple time constraint network, STCN) 是对具有时间知识和时间约束的系统进行描述和推理的有效方式<sup>[6]</sup>, 它将图论中处理问题的思想引入到约束满足问题的求解中。

**定义 1** 时间约束问题定义为一组变量集合  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  和一组变量上的约束集合  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 。

变量中的每个元素代表一个时间点, 而约束集合中的每个元素表示时间点之间的时间约束关系。对于存在二元时间约束关系的问题, 通常采用简单时间约束问题来描述和计算。

**定义 2** 当一个时间约束满足问题的所有 2 个时间点之间的约束都仅是一个区间时, 就称为简单时间约束问题。

简单时间约束问题包括一组具有一定连续域的时间点变量  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  和一组约束  $a_{ij} \leq X_j - X_i \leq b_{ij}$ , 其中,  $0 \leq a_{ij} \leq b_{ij}$ 。

采用有向加权图  $G_d = (V_d, E_d)$  来描述简单时间约束问题, 称  $G_d$  为距离图。图中的顶点仍是时间点的集合, 边  $i \rightarrow j$  标注权值  $b_{ij}$ , 表示线性不等式

$X_j - X_i \leq b_{ij}$ ; 边  $j \rightarrow i$  标注权值  $-a_{ij}$ , 表示线性不等式  $X_i - X_j \leq -a_{ij}$ 。

$G_d$  图中从  $i$  到  $j$  的每条路径  $i = i_0, i_1, \dots, i_k = j$ , 导致在  $X_j - X_i$  上存在约束公式:

$$X_j - X_i \leq \sum_{l=0}^k a_{i_{l-1}, i_l} \tag{1}$$

如果从  $i$  到  $j$  存在多条路径, 则:

$$X_j - X_i \leq d_{ij} \tag{2}$$

式中,  $d_{ij}$  是从  $i$  到  $j$  的路径中最短的一条路径长度。

基于以上研究, 空中编队协同对岸打击作战中, 空中编组任务的时间约束均为二元约束, 符合简单时间约束问题的特征, 可用简单时间约束网络方法进行研究。

2 协同计划冲突的检测

为了及时发现由于任务时间设置不当或任务的实际进展情况同协同计划不一致等情况而引起的冲突, 就必须对时间约束网络进行一致性处理, 以发现其中无法满足的时间约束, 即发现冲突约束, 以利于指战员及早作出对策。

**定理 1** 给定 STCN 是一致的, 当且仅当它的加权图  $G_d$  没有负环存在<sup>[7]</sup>。

该定理给出了判断简单时间问题是否有解的一种方法, 可以此为依据设计 STCN 的一致性检测算法。最常用的算法是图论中的 Floyd-Warshall 最短路径算法, 检查输出矩阵对角线元素的正负确定网络的一致性, 其时间复杂性为  $O(n^3)$ <sup>[8-9]</sup>。

Bellman-Ford 算法用于求解含负权重图中的最短路径问题。若加权图中没有负环路存在, 最短路径包含的边数最多只有  $n-1$  条; 因此, 若在  $n-1$  轮降距操作后, 其路径还可进行降距, 则该图存在负循环, 其时间复杂度为  $O(ne)$ 。实际应用中, 简单时间约束网络并非每对顶点之间都存在约束, 有  $e \ll n(n-1)$ , 即  $O(ne) \ll O(n^3)$ 。因此, 其可以非常快捷方便地检测加权图中是否存在负循环。其流程如图 2 所示。

空中编队协同对岸打击作战不同任务间的 STCN 建立以后, 可以通过一致性检测算法判断网络的一致性, 以验证协同计划的合理性。当一个新的任务加入时, 也可以通过一致性检测, 判断新的任务与原有任务之间是否存在冲突, 是否需要原

协同计划进行动态调整。

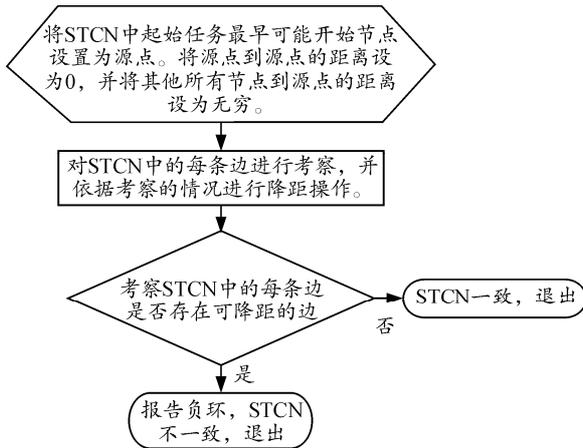


图 2 Bellman-Ford 算法流程图

### 3 案例分析

作战想定：红方航空兵计划对蓝方某岸岛阵地遂行空中突击。蓝方阵地有 1 个突击目标，配备有对空警戒、跟踪雷达和地空导弹等防空设施，并且能够得到航空兵的空中支援。红方拟出动的空中编组有：侦察组 1 个、压制组 1 个、电子干扰组 1 个、掩护组 1 个、突击组 1 个和观校组 1 个。按照红方协同计划，任务间 STCN 如图 3 所示。

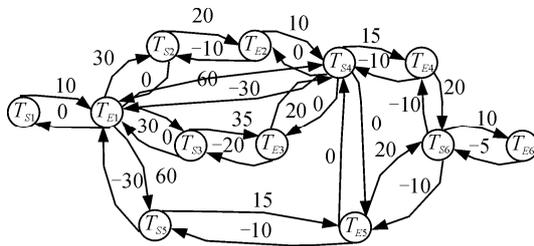


图 3 任务间的 STCN 图

针对红方协同计划的 STCN，进行一致性检测，检测结果表明：该协同计划不存在时间上的冲突，较为合理。

任务执行过程中，侦察组发现敌方阵地增加了一套地空防御设施。此时，要求压制组遂行 2 次压制任务，2 次压制任务的时间要求及任务间隔要求分别是 [10,20], [10,15], [5,10] 个时间单位。针对新增加的任务，修改任务间的 STCN，重新运用 Bellman-Ford 算法检测一致性，网络一致，为指挥员及时准确控制战斗进程提供了依据。

### 4 结束语

理论分析结果表明：提出的方法有效解决了空中编队对岸打击作战中的时间协同问题，并有效减小了时间复杂度，提高了协同效率。

### 参考文献：

- [1] 徐洸. 空军作战运筹[M]. 北京: 空军指挥学院出版社, 2002: 28-32.
- [2] Allen J. Maintaining knowledge about temporal intervals[J]. Communications of the ACM, 1983, 26(11): 832-843.
- [3] Allen J. Towards a general theory of action and time[J]. Artificial Intelligence, 1984, 23(2): 123-154.
- [4] EDDIE SCHWALB, LLUÍS VILA. Temporal Constraints: A Survey[J]. Constraints: An International Journal, 1998(2): 129-149.
- [5] 龙涛. 多UCAV协同任务控制中分布式任务分配与任务协调技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006: 21-25.
- [6] 徐瑞, 徐晓飞, 崔平远. 基于时间约束网络的动态规划调度算法[J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10(1): 188-194.
- [7] Muscettola N, Nayak P P, Pell B, et al. Remote agent: to boldly go where no AI system has gone before[J]. Artificial Intelligence, 1998, 103(1-2): 5-47.
- [8] 王海英, 黄强, 等. 图论算法及其 Matlab 实现[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 21-25.
- [9] 邹恒明. 算法之道[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 235-236.