

反导作战任务分配方法

董涛, 刘付显, 李响, 任俊亮

(空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051)

摘要 为充分发挥反导体系的作战能力,探讨了多任务与多资源的多属性匹配问题。以任务为中心进行反导任务分配,给出了多任务分配问题的描述。结合反导资源作战使用的实际情况,分析作战任务和资源的多维属性。通过引入资源能力负载系数,定义任务需求与资源能力之间的矢量距离。以资源冗余和最小化协同负载策略为优化原则,建立了任务分配数学模型。借鉴和改进多维动态列表规划算法的思想,设计了具体的求解步骤,确定了任务选择资源的优先级。通过案例分析,验证了所提方法的适用性。

关键词 反导;任务分配;资源;多维

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.03.010

中图分类号 O22 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)03-0041-04

An Approach to Anti-missile Task Assignment

DONG Tao, LIU Fu-xian, LI Xiang, REN Jun-liang

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: To make full use of the operations capability of anti-missile system, this paper discusses multi-dimensional attributes match problems between tasks and multi-resource, and describes multi tasks assignment problem focused on task. Considering the resource application in anti-missile operations, the paper analyzes the multi-dimensional attributes of operations tasks and resource. By introducing resource capability load coefficient, the paper defines a vector distance between the task requirement and the resource capability. Taking the resource redundancy and the cooperative load minimization as an optimization principle, the paper establishes a task assignment mathematic model. Based on improving the multi-dimensional dynamic list scheduling algorithm, the paper designs detail calculation steps and determines the task priority about selecting resource. By way of analysis and verification, the method is feasible and provides a new train of thought for the study of task assignment problems.

Key words: anti-missile; task assignment; resource; multi-dimensional

当反导体系面临多批次、多方向、多阶段、多型号的战术弹道导弹(Tactical Ballistic Missile, TBM)来袭时,更强调其体系效能。为了能最大效

益地发挥体系反导作战能力,必须以作战任务为中心进行合理的反导任务分配,集成广域分布、功能各异的有限资源,构建高效的多层防御体系^[1]。

收稿日期:2013-05-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61272011)

作者简介:董涛(1984-),男,山东邹平人,博士生,主要从事防空反导作战决策分析研究。E-mail:dongtao-gaojian@163.com

引用格式:董涛,刘付显,李响,等.反导作战任务分配方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(2):41-44. DONG Tao, LIU Fuxian, LI Xiang, et al. An approach to anti-missile task assignment[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(2): 41-44.

任务分配理论复杂多样。按照不同的协调机制,任务分配的方法可以分为分布式方法和集中式方法^[2-4]。

虽然任务分配方法多种多样,但目前在国内外公开刊物上看到的反导任务分配资料很少^[5]。本文针对反导作战的特点,设定由借鉴和改进列表规划法的匹配思想,给出反导任务和资源描述方法,探讨任务-资源匹配的数学模型、约束条件、优化策略和求解算法。

1 问题描述

反导任务分配是响应入侵 TBM 而形成的防御规划,可这样描述:给定任务集合和可用的资源集合。任务集合确定了待分配资源的任务序列;资源集合具备完成某一任务的作战能力。在满足资源约束的情况下,任务和资源之间通过任务的资源需求矢量和资源的能力矢量相关联,根据任务分配优化策略,实现任务-资源的合理匹配。假设条件为:① TBM 入侵防御区域之前,各资源已作好充分准备且都是可用资源;② 根据保卫目标的重要性、TBM (或弹头)类型和发射点等参数,已确定每个任务的优先级。

2 要素分析

反导任务分配是以任务为核心的作战资源管理与控制技术。其关键要素是任务和资源^[6-7]。作战任务的实施最终要落实到作战资源。为了实现任务和资源的合理匹配,首先分析任务和资源的特性。

2.1 任务分析

反导作战针对特定目标,即 TBM。反导作战任务是为抗击 TBM 而实施的行动集合,是由功能各异的作战资源协同执行的。任务模型包括任务集合 \mathbf{T} 和任务的资源需求集合 \mathbf{R} 。

$\mathbf{T} = \{T_1, T_2, \dots, T_M\}$, 其中 M 为 TBM 的数量。任务 T_i 的资源需求矢量 $\mathbf{R}_i = [R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{iH}]$, 其中 H 为所需资源类型的维数, R_{ij} 为任务 T_i 需要第 j 类型资源能力需求的量化数值。

2.2 资源分析

资源是执行作战任务所需的物理实体,包括预警探测装备、末段高层拦截系统等。任务与资源之间是多对多的关系。资源模型包括资源集合 \mathbf{Z} 和资源能力属性 \mathbf{A} 。

$\mathbf{Z} = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_i, \dots, Z_P | 1 \leq i \leq P\}$, 其中 Z_i 为第 i 个资源平台, P 为可用资源平台的种类。反

导作战可调用的资源数量较多、功能各异、能力多样。资源能力属性是描述作战资源能力以及判别所选作战资源能否完成特定任务的基础。不同任务需要不同的多维作战资源能力。

资源有自身的能力属性,如探测距离、交接距离、分辨率、拦截高度等。资源能力矢量与任务的资源需求矢量维数相一致。定义第 i 个资源能力矢量 $\mathbf{A}_i = [A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{ij}, \dots, A_{iH}]$, 其中 A_{ij} 为第 i 类资源在第 j 维上的能力度量数值。

3 任务分配策略

任务分配问题关注多个优化指标,本文选取资源冗余和协同负载 2 个关键指标^[6-7], 给出任务分配的优化策略。

3.1 资源冗余策略

TBM 来袭往往呈现多批次、多方向和多层次特征。由于针对 TBM 探测、跟踪、拦截等过程消耗的资源较多,需要合理评估当前的可用资源总量和预估资源消耗量,以便保障任务对雷达和拦截器的资源需求。为确保作战体系的鲁棒性,应让资源维持一定的冗余度。资源能力超出任务资源需求越多,表明资源对任务的自适应能力越强。否则,资源缺乏(雷达目标通道不足、拦截器的匮乏等)将导致无法完成下一波次来袭 TBM 的探测与拦截任务。因此,任务分配时需要设置资源能力负载系数 $\lambda (0 < \lambda < 1)$, 即某一资源在执行一个或多个任务时可消耗能力占其全部能力的比例。资源在分配过程中不考虑承载任何任务(即全闲置)时 $\lambda = 0$; 作战能力完全发挥时 $\lambda = 1$ 。作战单元在被指派给某一任务后,其能力负载受到削弱。在没有补给的情况下,资源平台连续作战时其冗余量化为:

$$\mathbf{A}_j = \begin{bmatrix} \lambda \mathbf{A}_{j1} - \sum_{i=1}^M x_{ij} \mathbf{R}_{i1} \\ \lambda \mathbf{A}_{j2} - \sum_{i=1}^M x_{ij} \mathbf{R}_{i2} \\ \vdots \\ \lambda \mathbf{A}_{jH} - \sum_{i=1}^M x_{ij} \mathbf{R}_{iH} \end{bmatrix}^T, (1 \leq j \leq p) \quad (1)$$

式中,若第 i 个任务分配给第 j 个资源,则 $x_{ij} = 1$, 否则 $x_{ij} = 0$ 。

在作战资源任意能力维度上,完成任务所消耗的能力不能超过分配资源的负载能力。其式为:

$$\sum_{i=1}^M x_{ij} \mathbf{R}_{iH} \leq \lambda \mathbf{A}_{jH} \quad (2)$$

3.2 最小化协同负载策略

在任务执行过程中存在作战单元的协同,即多

个资源协同探测和拦截同一 TBM。在任务需要不同资源协同完成,资源个体又能同时处理多个任务的情况下,任务与资源的多维属性匹配的复杂性大大增加。满足任务的能力需求是任务分配的首要目标。若多个资源协同完成同一任务时,各类资源在不同的能力属性上的能力总量应不小于任务的资源需求,即:

$$\lambda \sum_{j=1}^P x_{ij} A_{jh} > R_{ih} \quad (3)$$

协同作战存在一定的副作用,如时间的延迟、空间的差异等。在单一任务上聚集过多资源可能导致协同复杂化,反而降低了资源的效率。因此,在满足作战任务能力需求基础上,要尽量减少资源之间不必要的协同。单一资源的能力能满足某一任务的能力需求时就不用选择多个平台来协同完成这一任务,最小化协同负载策略可表示为:

$$\min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^P x_{ij} \quad (4)$$

一方面需要最大限度发挥作战单元在不同能力属性上的负载,减少资源之间的协同负载;另一方面,力求在某一任务上聚集最少的作战资源,在某一资源平台能独立完成某一任务时,尽量形成一对一的匹配关系。记任务 T_i 的能力需求矢量 R_i 与资源 Z_j 的能力矢量距离 D_{ij} 为:

$$D_{ij} = \begin{cases} \|R_i - A_j\| = \sqrt{\sum_{h=1}^H (R_{ih} - A_{jh})^2}, & R_{ih} < A_{jh} \\ 0, & R_{ih} \geq A_{jh} \end{cases} \quad (5)$$

在 $R_{ih} < A_{jh}$ 条件下 D_{ij} 越小,表明任务的资源需求 R_i 与资源的能力矢量 A_i 相差越小, Z_j 执行 T_i 的优先权越高。最小化协同负载问题可转化为矢量距离 D_{ij} 最小化,其式为:

$$\min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^P x_{ij} \Leftrightarrow \min D_{ij} \quad (6)$$

任务上聚集一定资源以满足任务的资源能力需求,本质上是一种资源集成配置的优化过程。最小化协同负载是在保证满足任务资源需求的条件下,最小化聚集在某一任务上的资源,既减少或避免了资源浪费,又能够保证有一定的资源冗余。如果某一资源可以独立完成某一任务,则资源之间协同承担的任务较少,可以有效地降低协同副作用。因此,以上 2 个策略并不矛盾。根据以上分析,得到反导任务分配的数学模型为:

$$\min D_{ij} = \min \left\{ \|R_i - A_j\| = \sqrt{\sum_{h=1}^H (R_{ih} - A_{jh})^2} \right\}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \lambda A_{jh} > \sum_{i=1}^M x_{ij} R_{ih} \\ \lambda \sum_{j=1}^P x_{ij} A_{jh} > R_{ih} \end{cases} \quad (7)$$

4 模型求解

Levchuk 提出的多维动态列表规划 (Multi-Dimensional Dynamic List Scheduling, MDLS) 算法及其改进算法为任务和资源匹配提供了可行的求解思路,因此在任务分配中得到较广泛的应用^[8,9]。

本文借鉴 MDLS 核心思想^[10],考虑实际作战过程中的资源约束,设计了反导任务分配问题的求解步骤。给定任务集合和资源集合,通过不断迭代,依次为各个任务分配当前最优的作战资源,直到满足全部任务的资源需求。算法流程如下:

STEP1 建立初始的任务模型与资源模型;

STEP2 如果处于迭代阶段,则更新任务集合,删除已分配资源的任务,缩小任务集合空间;

STEP3 更新资源集合,根据资源约束条件筛选可用的资源平台,删除不满足资源约束的资源;

STEP4 计算需分配资源的任务与各个可用资源的能力矢量距离 D_{ij} ;

STEP5 对 D_{ij} 进行排序,确定任务选择资源的优先级。 $\min D_{ij}$ 对应的 Z_j 为任务 T_i 分配的资源;

STEP6 判断所有任务是否已经分配资源,如果还有未分配的任务,返回 **STEP2**,再次迭代,否则,输出全局的任务分配结果。

5 仿真分析

以 7 个 TBM 来袭为想定背景,将其描述为 7 个子任务。 $T = \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7\}$, $R = [R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6]$ 。任务属性见表 1。

表 1 任务属性表

Tab.1 Task attribute

任务	资源需求					
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
T_1	2	1	1	1	3	2
T_2	1	1	1	1	3	1
T_3	0	1	0	1	1	1
T_4	2	1	1	1	2	1
T_5	1	1	1	1	2	1
T_6	2	1	1	1	3	0
T_7	3	1	1	1	4	0

$Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_5\}$, $A = [A_1, A_2, \dots, A_5]$ 。

资源属性见表 2。

表2 资源属性表
Tab.2 Resource attribute

资源	能力					
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
Z_1	5	2	3	7	10	9
Z_2	6	3	6	5	9	10
Z_3	5	5	8	6	7	5
Z_4	6	7	5	3	9	6
Z_5	4	5	4	6	10	7

令 $\lambda=0.9$, 根据表 1、表 2 和算法流程, 得到任务分配结果见表 3。

表3 任务分配结果
Tab.3 Task assignment result

任务	资源				
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
T_1	0	0	0	1	0
T_2	0	0	0	1	0
T_3	0	0	1	0	0
T_4	0	0	1	0	0
T_5	0	0	1	0	0
T_6	0	0	0	0	1
T_7	1	0	0	0	0

从表 3 可见, 资源 4 执行任务 1、2, 资源 3 执行任务 3、4、5, 资源 5 执行任务 6, 资源 1 执行任务 7。全部任务都已经分配了资源, 资源 2 处于空闲状态, 资源 1、3、4、5 各有剩余能力矢量, 资源总体上保持了一定的冗余度。

6 结语

针对多任务与多资源的多维属性匹配问题, 以资源冗余和最小化协同负载为优化策略, 考虑资源损耗和约束, 建立了任务分配数学模型。借鉴 MDLS 算法的思想, 设计详细的算法步骤, 求解结果证明本方法是可行的。但是, 本文仅研究了部分要素, 还有很多细节需要深入研究, 例如资源能力负载系数的细化设定、动态任务分配、资源多维能力重组、任务聚类等。

参考文献(References):

- [1] 黄树彩, 康红霞, 李为民. 空天信息支持反导武器系统拦截作战效果分析[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(3): 508-511. HUANG Shucui, KANG Hongxia, LI Weimin. Intercepting operational effects analysis of anti-TBM weapon systems with aerospace information support[J]. Systems engineering and electronics, 2012, 34(3): 508-511. (in Chinese)
- [2] 周翔翔, 姚佩阳, 张杰勇, 等. 任务分配方法及其在指挥控制领域的应用[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(12): 87-91.

ZHOU Xiangxiang, YAO Peiyang, ZHANG Jieyong, et al. Survey of task allocation and analysis of the methods' application in command and control domain[J]. Fire control & command control, 2012, 37(12): 87-91. (in Chinese)

- [3] Bui H, Han X, Mandal S, et al. Optimization based decision support algorithms for a team-in-Loop planning experiment [C]//Proceedings of the 2009 IEEE international conference on systems man and cybernetics. San Antonio, TX, USA: IEEE press, 2009: 4684-4689.
- [4] Woosun A, Park C, Pattipati K, et al. HMM and auction-based formulations of ISR coordination mechanisms for the expeditionary strike group missions[C]//Proceedings of the 14th international command and control research and technology symposium. Washington, DC: ICCRTS press, 2009: 1-27.
- [5] 曾松林, 滕克难, 王文辉, 等. 编队反导资源调度问题分析[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2012, 13(1): 62-68. ZENG Songlin, TENG Kenan, WANG Wenyun, et al. Analysis of problem of warship formation antimissile resource scheduling[J]. Journal of PLA university of science and technology: natural science edition, 2012, 13(1): 62-68. (in Chinese)
- [6] 阳东升, 张维明, 刘忠. C2 组织资源集成策略与方法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(12): 2400-2409. YANG Dongsheng, ZHANG Weiming, LIU Zhong. Strategy and approach to integrating combat resource for C2 organization [J]. Systems engineering theory & practice, 2011, 31(12): 2400-2409. (in Chinese)
- [7] 陈聪. 弹道导弹防御指控系统关键技术及其建模仿真研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010. CHEN Cong. Study on key technologies modeling and simulation of command and control system in ballistic missile defense[D]. Changsha: National university of defense technology, 2010. (in Chinese)
- [8] Levchuk G M, Levchuk Y N, Luo J, et al. Normative design of organizations-part I: mission planning[J]. IEEE trans on systems man and cybernetics-part a: systems and humans, 2002, 32(3): 346-359.
- [9] Mandal S, Han X, Pattipati K R, et al. Agent-based distributed framework for collaborative planning[C]//Proceeding of the IEEE international conference of aerospace conference. [S. l.]: IEEE press, 2010: 22-27.
- [10] 张杰勇, 姚佩阳, 周翔翔, 等. 基于 DLS 和 GA 的作战任务-平台资源匹配方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(5): 947-954. ZHANG Jieyong, YAO Peiyang, ZHOU Xiangxiang, et al. Approach to operation task and platform resource matching based on DLS and GA [J]. Systems engineering and electronics, 2012, 34(5): 947-954. (in Chinese)

(编辑: 田新华)