

基于协同效能的反导作战任务分配模型

王幸运¹, 田野¹, 强晓明², 钱俊³

(1. 空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051; 2. 93987部队, 青海西宁, 810007;
3. 空军工程大学理学院, 陕西西安, 710051)

摘要 提出了一种基于效能最优的多个反导武器系统协同反导作战任务分配模型。阐明了任务分配与目标分配的关系, 给出了任务生成原理, 建立了考虑任务分配均匀性和一致性的静态任务分配优化模型; 为建模方案之间的协同约束, 定义了基本效能、自协同效能和互协同效能; 基于粒子群优化算法进行了求解。仿真结果表明: 建立的模型和方法适用于静态任务分配问题, 所得结果合理有效, 能够反映出任务协同在多个反导武器系统协同反导任务中的优势。

关键词 反导作战; 任务分配; 协同效能; 粒子群优化; 目标分配

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.04.007

中图分类号 TJ945.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)04-0027-05

Mission Assignment Model for Anti-missile Combat Based on Cooperative Efficiency

WANG Xing-yun¹, TIAN Ye¹, QIANG Xiao-ming², QIAN Jun³

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Unit 93987, Xining 810007, China; 3. Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: A mission assignment model of multi-anti-missile combat based on the effectiveness optimization is proposed. First, the relation between mission assignment and target allocation is clarified, based on which the mission generation principle is put forward and the mission assignment model considering the uniformity and coherence performance is established. Then, in order to describe the cooperation of schemes, the basic effectiveness, the self-cooperative efficiency and the inter-cooperative efficiency are defined. At last, the particle swarm optimization (PSO) is used to solve this optimization problem and the simulation shows that the method and the model proposed in this paper are effective in mission assignment problem for cooperative anti-missile combat, and also shows the advantage of mission cooperation in the cooperative anti-missile mission of multi-anti-missile weapon systems.

Key words: anti-missile combat; mission assignment; cooperative efficiency; particle swarm optimization (PSO); target assignment

多个反导武器系统协同反导的目的是通过对资 源的合理配置, 达成作战效能优化的目的^[1]。对多

收稿日期: 2013-02-27

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2010JQ8007)

基金项目: 王幸运(1977-), 女, 河北肃宁人, 博士生, 主要从事联合防空作战指挥研究。

E-mail: Wangxingy_tg@126.com

个反导武器系统资源的优化可以看作任务分配和调度的过程。现有的研究中经常提到的2个概念分别是目标分配和任务分配^[2-3],这2个概念含义存在很多共性,但又不完全相同。就字面意思而言,目标较为具体,而任务是一个抽象概念;另外,目标分配较为单纯,仅需要完成对资源的一次性优化配置,而任务分配更为复杂,涉及到资源在时间域的调度问题。经典的目标分配模型^[4-9]主要侧重于武器目标的指派,未对更为细化的子系统工作状态进行描述。本文结合上述文献研究成果,针对多个反导武器系统反导作战的任务分配问题进行研究。

1 协同目标分配与协同任务分配关系

1.1 协同目标分配的局限性

随着目标突防能力的不断提升和突防战术的不断改进,目标分配问题显示出一定的局限性:

1)从本质上看,协同目标分配是基于当前态势形成武器与目标的最优配对,但复杂环境下协同反导作战的目标分配更多发生在拦截目标之前,交战之前的分配结果在双方态势发生变化后能否适应无法确定。

2)协同目标分配更多的是一种偏于顶层的火力打击分配,实际上,具体的拦截执行过程涉及到多个子任务过程,且多个子任务之间有较强的时间、空间约束,这些问题在火力分配中都无法进行详细的描述和建模。

3)协同目标分配未考虑任务执行时间指标,实际作战过程中,即使在多目标攻击模式,对每个分配目标的攻击时间也是不同步的;需要对任务执行时间资源等进行分析,给出更为科学的分配方案。

4)无法建模多个反导武器系统共同执行的协同任务。在一次综合打击中,可能多个拦截系统同时对一个目标执行探测、攻击和干扰,而传统方法无法对此进行建模,不能反映协同防御带来的效能提升。

1.2 协同任务分配

通过分析协同多目标分配的局限性,可以将反导作战目标分配扩展为多个反导武器系统协同反导作战任务分配问题。任务分配是指通过将协同防御中的各个环节细分为各种传感器工作状态级的任务,并在多个反导武器系统之间进行子任务的合理配置,达到最佳防御作战效果的过程。协同任务分配更加深刻的反映了防御过程中的多个反导武器系统协作,相对目标分配而言具有更强的可实施性。协同任务分配问题可分为静态任务分配和动态任务分配。本文主要解决静态分配问题。

2 任务分配建模与求解

2.1 任务生成原理

不失一般性,设包含 V 个成员的多反导武器系统协同作战,成员 i 含有 $S_i(i=1,2,\dots,V)$ 个子系统,成员 i 的子系统 k 所含任务状态数量为 $O_s^i(i=1,2,\dots,V;s=1,2,\dots,S_i)$;系统包含 T 个目标,所有目标均需要进行任务分配,任务生成原理见图1。

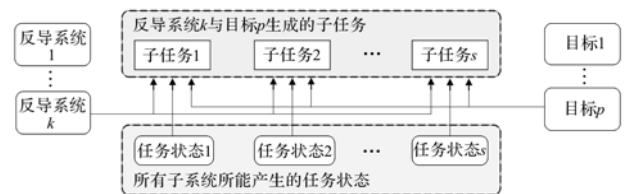


图1 任务生成原理

Fig. 1 The mission generation principle

1)反导武器系统 i 各子系统所具备的总的任务

状态数量为 $\sum_{s=1}^{S_i} O_s^i$,将反导武器系统 i 的所有任务状

态与目标 j 结合,则生成的子任务数量为 $\sum_{s=1}^{S_i} O_s^i$ 。

2)反导武器系统 i 的任务状态与所有目标结合,反导武器系统 i 的所有子任务的数量为 $T \sum_{s=1}^{S_i} O_s^i$ 。

3)多个反导武器系统各成员与所有目标结合,生成各自的子任务,则系统的子任务数量为 $N_m =$

$$T \sum_{i=1}^V \sum_{s=1}^{S_i} O_s^i。$$

4)所有子任务构成任务集,则任务集表示记为 $Mission = \{M^1, M^2, \dots, M^V\}$,式中: $M^i = \{M_1^i, M_2^i, \dots, M_{S_i}^i\}$; $M_k^i = \{m_k^i(1), m_k^i(2), \dots, m_k^i(O_k^i)\}$ 。

2.2 任务有效性判断

上述生成的任务是所有可能的任务。实际上,给定战场态势,任务状态只在某一阶段有效,并非所有任务都是有效的,必须结合领域知识对一部分非有效的任务进行剔除,以减小决策规模。

某时刻任务状态 z 的有效性由该时刻系统的反导作战态势条件决定,而反导作战状态可以用一系列的判断属性 $c(c \in C)$ 表示,属性 c 的取值均可以用二元函数 $g(c)$ 来描述, $g(c) = 1$ 时表示属性 c 有效, $g(c) = 0$ 时表示属性 c 无效。

判断属性 c 包含着目标信息,也就是系统对于不同的目标可能实现不同的任务状态。任务状态 z 的有效性函数可表示为:

$$z = \prod_{i=1}^{N_c} g(c_i) \quad (1)$$

式中: c_i 为各判断属性; N_c 为属性数量。任务状态有效时,对应的任务为有效任务,否则为无效任务。经有效性检测后,剔除无效任务,有效任务的数量记为 N_e ,有效任务集合记为: $\text{ValidMission} = \{m_1, m_2, \dots, m_{N_e}\}$ 。

协同反导作战静态任务分配问题表述为:在给定时刻,在从 N_m 种任务中选取一定量的有效任务,合理的指派给 T 个目标,使系统整体作战效能最大。

2.3 任务分配的约束优化模型

为简单计,将上述所有子任务集中的子任务平等对待,并依次记为 $\text{Mission} = \{m_1, m_2, \dots, m_{N_m}\}$ 。为表述各任务之间的协同对整体效能的影响,定义基本效能矩阵、自协同效能矩阵和互协同效能矩阵。

1) 以矩阵 $\mathbf{B} = \{b_{i,j}^{(k)}\}$ 表示基本任务效能矩阵, $b_{i,j}^{(k)}$ 为反导武器系统 i 对选定目标 j 执行子任务 m_k 时的基本效能,各成员存在多个子任务,因而此矩阵为三维矩阵;

2) 以矩阵 $\mathbf{S} = \{s_{k,l}\}$ 表示自协同效能矩阵, $s_{k,l}$ 为某一成员同时执行子任务 o_k 和子任务 o_l 时的自身协同效能;

3) 以矩阵 $\mathbf{C} = \{c_{k,l}\}$ 表示互协同效能矩阵, $c_{k,l}$ 为不同成员分别对某一目标执行子任务 o_k 和子任务 o_l 时系统的协同效能。

定义二进制决策变量 $x_{ij}^{(k)}$, $x_{ij}^{(k)} = 1$ 表示单个反导武器系统 i 对目标 j 执行任务 o_k ;在此基础上,定义二进制变量 $y_i^{(k,D)}$ 表示单个反导武器系统 i 同时执行子任务 o_k 和 o_l 的标志, $y_i^{(m,n)} = 1$ 表示此标志为真;定义二进制变量 $z_j^{(k,D)}$ 表示同时对目标 j 执行子任务 o_k 和 o_l 的标志, $z_j^{(m,n)} = 1$ 表示此标志为真,则系统总体效能计算如下:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = \sum_{i=1}^V \sum_{j=1}^T \sum_{k=1}^{N_m} b_{i,j}^{(k)} x_{ij}^{(k)} + \sum_{i=1}^V \sum_{k=1}^{N_m} \sum_{l \neq k, l=1}^{N_m} s_{k,l} y_i^{(k,D)} + \sum_{j=1}^T \sum_{k=1}^{N_m} \sum_{l \neq k, l=1}^{N_m} c_{k,l} z_j^{(k,D)} \quad (2)$$

则静态任务分配问题可表示为约束优化问题:

$$\begin{aligned} & \max J = E \\ & \text{s.t.} \begin{cases} x_{ij}^{(k)} \leq \begin{cases} 1, \text{if } V_j^{(k)} = 1 \\ 0, \text{else} \end{cases} \\ \sum_{j=1}^T x_{ij}^{(k)} \leq C_i^{(k)}, i = 1, 2, \dots, V, k = 1, 2, \dots, N_m \\ \sum_{i=1}^V \sum_{k=1}^{N_m} x_{ij}^{(k)} \geq \begin{cases} 1, \text{if } \forall V_j^{(k)} = 1 \\ 0, \text{else} \end{cases}, j = 1, 2, \dots, T \end{cases} \quad (3) \end{aligned}$$

约束条件 1:任务有效性约束, $V_j^{(k)}$ 表示指派的子任务是否有效,若无效则不能分配;

约束条件 2:假定任务状态 i 最多可分配给 $C_i^{(k)}$

个目标,即每个任务状态所能作用的目标数量有限;

约束条件 3:每个目标至少分配一种任务,除非对此目标的所有任务状态均无效。

实际上,由于决策变量 $x_{ij}^{(k)}$ 表示拦截系统、目标、子系统和任务状态等 4 个属性的配对关系,是一个多维变量,可将其写为 $x_{i,s,o,j}$ ($i = 1, 2, \dots, V, s = 1, 2, \dots, S_i, o = 1, 2, \dots, O_s^j, j = 1, 2, \dots, T$), $x_{i,s,o,j}$ 表示将反导武器系统 i 的子系统 s 的任务状态 o 指派给目标 j ,同时, $b_{i,j}^{(k)}$ 也记为 $b_{i,s,o,j}$,则上述指标函数的第 1 项可写为:

$$E_1 = \sum_{i=1}^V \sum_{s=1}^{S_i} \sum_{o=1}^{O_s^j} \sum_{j=1}^T b_{i,s,o,j} x_{i,s,o,j} \quad (4)$$

下面结合任务分配的均匀性和一致性对上述指标函数进行修正。任务分配的均匀性是指所有任务状态应分配给尽可能多的目标,即避免任务分配集中于少数重要目标;任务分配的一致性是指在条件允许的情况下,同一个反导武器系统的任务状态应尽可能多的分配给同一个目标。考虑这 2 个约束条件的优化指标函数可写为:

$$E'_1 = h_1 \left\{ \sum_{j=1}^T \left| p_j - \frac{V}{T} \right| \right\} h_2 \left\{ \sum_{i=1}^V \left| q_i - \frac{T}{V} \right| \right\} \cdot \sum_{i=1}^V \sum_{s=1}^{S_i} \sum_{o=1}^{O_s^j} \sum_{j=1}^T b_{i,s,o,j} x_{i,s,o,j} \quad (5)$$

式中: $h_1(\cdot)$ 表示任务分配均匀性修正项; $p_j = \sum_{i=1}^V \sum_{s=1}^{S_i} \sum_{o=1}^{O_s^j} x_{i,s,o,j}$ 为对目标 j 分配的子任务数量; $\sum_{j=1}^T \left| p_j - \frac{V}{T} \right|$ 为整体的任务分配均匀性,取值越小,均匀性越好,取值越大,均匀性越差; $h_2(\cdot)$ 为任务

分配的一致性修正项; $q_i = \sum_{s=1}^{S_i} \sum_{o=1}^{O_s^j} \sum_{j=1}^T x_{i,s,o,j}$ 为已分配给反导武器系统 i 的任务所对应的目标数; $\sum_{i=1}^V \left| q_i - \frac{T}{V} \right|$ 为任务分配的一致性,取值越小,一致性越好,取值越大,一致性越差。

综上,给出指标函数如下:

$$\max E' = E'_1 + E_2 + E_3 \quad (6)$$

2.4 基于协同的任务效能模型

协同反导作战任务涵盖作战的各个阶段,为保证算法的有效性,任务的效能值应能够反映任务的重要程度、执行任务所带来的收益以及任务代价等因素,这是一个复杂的过程,定量分析需借助于专家知识。

1) 基本效能。基本效能矩阵表示反导武器系统执行某一基元任务(即任务的基本单元,指任务分解后得到的最小任务单元)的效能。根据给定成员和

目标配对并指定任务类别,即可计算出基本效能阵。各基元任务的基本效能应能够反映任务执行带来的收益、代价以及任务的紧迫性等,给出定量算法后应进行归一化,以便于比较。关于反导武器系统的传感器系统、拦截打击系统、电子战系统的效能计算模型可部分参见文献[1,10],其余应根据不同任务类别进行构建,此处不做赘述。

2)自协同效能。自协同效能表示同一反导武器系统同时执行 2 个基元任务时所带来的效能增量。自身协同效能正值表示 2 个任务状态之间相互促进,负值表示 2 个任务状态之间相互抑制,0 表示 2 个任务状态之间互不影响,一般应由专家知识给定。

3)互协同效能。互协同效能表示不同反导武器系统同时对一个目标执行不同基元任务时所带来的效能增量。多个反导武器系统反导协同效能正值表示 2 个任务状态之间相互促进,负值表示 2 个任务状态之间相互抑制,0 表示 2 个任务状态之间互不影响,一般应由专家知识给定。

3 仿真分析

上述静态任务分配的优化模型的求解为组合优化问题,为确保算法适用于大规模问题,本文基于粒子群优化^[11](Particle Swarm Optimization, PSO)求解。下面只验证算法的有效性,系统的各项效能值随机给出,任务有效性也随机设定。

战场想定如下:V 个反导武器系统,蓝方目标 T 个,各成员均具备探测、杀伤、干扰等 3 个子系统,各

子系统对应的任务状态数量均为 3,即各子系统所有任务状态共计 9 个;各任务的最大分配数量依次为 4,4,4,2,2,2,3,3,3;对每个成员和目标配对,随机选择 3 个任务状态置为无效状态,此时,基本效能阵 **B** 为 $V \times T \times 9$ 维的矩阵,基本效能矩阵 **B** 的数值设为 $[0,1]$ 之间的随机数;自协同效能矩阵 **S** 的元素设置为 $[-0.5,0.5]$ 之间的随机数,互协同效能矩阵 **C** 的元素设置为 $[-0.5,0.5]$ 之间的随机数,在 **S** 和 **C** 中随机选择 40% 的元素置为 0,表示方案之间互不影响。

确定上述基本数据后,基于 PSO 算法进行搜索即可获取分配方案。PSO 算法中,解的编码采用十进制编码,见图 2,编码前 T 位为成员 1 对目标 1~T 的方案分配(取值为 1~9),其余类推,共含 $V \times T$ 位。粒子群初始化采用随机方法,但应满足各类任务的最大分配数量;进化过程中出现的非可行解直接剔除并重新生成,保持种群数量稳定。

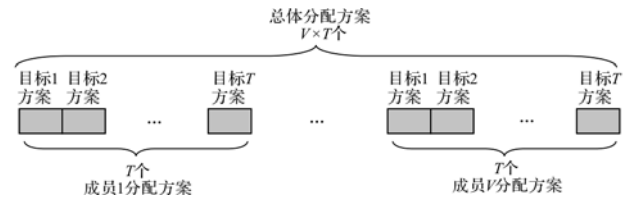


图 2 粒子编码示意图(十进制)

Fig. 2 Sketch of particle coding (decimalist)

设定粒子个数为 20 个,最大迭代次数为 1 000,当连续 50 次收益函数无改进时退出,依次对如下 6 种场景进行仿真分析。每种情况运行 20 次统计平均结果见表 1。

表 1 任务分配的 PSO 算法运行结果统计值

Tab. 1 The PSO running result statistic of mission assignment

场景	系统规模	有效任务数量	运行步数	运行时间/s	系统基本效能	系统总效能	协同效能增量/%	分配均匀性	分配一致性
1	V=2, T=2	36	77	0.375 922	2.65	3.12	0.47(15)	2	2.0
2	V=2, T=4	72	114	0.892 194	5.01	6.64	1.63(24)	3	5.0
3	V=2, T=8	144	206	1.508 313	7.40	9.43	2.03(21)	1	7.5
4	V=4, T=4	144	198	1.431 467	7.67	10.69	3.02(28)	5	5.0
5	V=4, T=8	288	428	3.066 554	14.32	18.65	4.33(23)	6	10.0
6	V=4, T=16	576	611	3.989 864	27.43	34.01	6.58(19)	3	16.0

可以看出,基于协同效能的分配方法使系统效能有显著提升,平均提升在 20% 以上,在反导武器系统成员数量和目标数量相当的情况下,任务分配效能提升最大;分配均匀性也较好,符合前述模型的

意图;从计算速度上看,满足在线计算要求。

为更直观地证明本文所提方法的有效性,对场景 6,进行了 20 次仿真实验的系统总效能和基本效能见图 3。

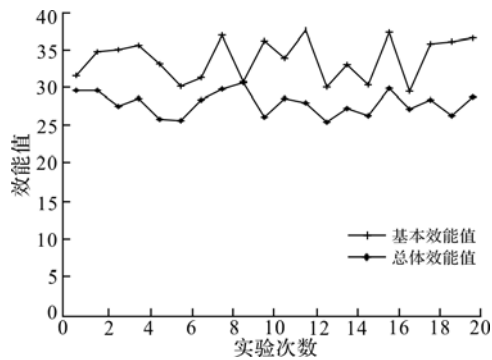


图3 场景6的20次仿真实验的效能曲线

Fig. 3 The efficiency curve of simulation testing of scene six

4 结语

本文建立的考虑任务分配均匀性和一致性的静态任务分配优化模型对于多个反导武器系统协同静态任务分配问题是有效的,适用于多个反导武器系统反导作战的协同任务决策。多个反导武器系统协同多目标攻击的任务状态决策方法较好地解决了协同条件下任务分配问题,并且充分利用不同成员的任务执行优势,达到了资源优化配置的目的。实际应用中,任务的基本效能、协同效能等参数以及任务有效性的判定应根据双方性能参数、态势信息和具体任务给出计算模型,以确保任务分配的合理性。

参考文献(References):

- [1] 王红军,迟忠先. 编队干扰方案协同决策研究[J]. 系统工程理论与实践,2007,27(4):171-176.
WANG Hongjun, CHI Zhongxian. The research on fleet jamming plan decision-making based on collaboration [J]. Systems engineering theory & practice, 2007,27(4):171-176. (in Chinese)
- [2] Xin B, Chen J, Peng Z H, et al. An efficient rule-based constructive heuristic to solve dynamic weapon-target assignment problem [J]. IEEE trans on systems man and cybernetics part a systems and humans, 2011,41(3):598-606.
- [3] 唐苏妍,梅珊. 基于扩展合同网协议的分布式武器目标分配方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011,33(3): 568-574.
TANG Suyan, MEI Shan. Distributed weapon target assignment algorithm based on extended contract net protocol [J]. Systems engineering and electronics, 2011,33(3):568-574. (in Chinese)
- [4] Li X, Dang S, Li K J. Multi-agent-based battlefield reconnaissance simulation by novel task decomposition and allocation[C]//The 5th international conference on computer science & education. Hefei, China: [s. n.],2010:1410-1414.
- [5] Li P, Yang Y M, Lian J L. Layered task allocation in multi-robot systems[J]. IEEE transactions on global congress on intelligent systems,2009,23: 62-67.
- [6] Erkan S, Kandemir M, Giger G. Advanced task assignment for unmanned combat aerial vehicles targeting cost efficiency and survivability[C]//46th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit. Reno, Nevada: AIAA press,2008:7-10.
- [7] Zheng T X, Li J Q. Multi-robot task allocation and scheduling based on fish swarm algorithm[C]//Proceeding of the 8th world congress on intelligent control and automation. Jinan, China: [s. n.],2010: 6681-6685.
- [8] Shima T, Rasmussen S J, Sparks A G, et al. multiple task assignments for cooperating uninhabited aerial vehicles using genetic algorithms[J]. Computers & operations research, 2006,33: 3252-3269.
- [9] Pongpunwattana A, Rysdyk R. Real-time planning for multiple autonomous vehicles in dynamic uncertain environments[J]. Journal of aerospace computing information and communication, 2004, 1(12): 580-605.
- [10] 李义军,黄俊. 基于生存力分析的战斗机超视距空战效能评估[J]. 飞机设计,2007,27(6):56-59.
LI Yijun, HUANG Jun. Survivability analysis based evaluation of beyond visual range air combat effectiveness for fighter aircraft [J]. Aircraft design, 2007,27(6):56-59. (in Chinese)
- [11] hajehzadeh M, Taha M R. Reliability analysis of earth slopes using hybrid chaotic particle swarm optimization[J]. Journal of central south university of technology,2011, 18:1626-1637.

(编辑:田新华)